

## الفهرس

٥	إهداء
٦	كلمة الناشر
٧	مقدمة
١٣	الباب الأول - تمهيد
١٧	الباب الثاني - المواد المستعملة في صناعة الكابلات
١٨	قلب الكابل
٢٦	العازل
٣٧	الغلاف المعدني
٣٨	الحماية الميكانيكية - التسليح
٣٩	الحماية الخارجية
٤٤	الحشو
٤٥	الباب الثالث - الكابلات المعزولة بالورق
٤٦	الكابلات المصمتة
٤٦	كابلات القلب الواحد
٤٦	الكابلات عديدة القلوب
٥٦	اعتبارات عامة
٥٨	الباب الرابع - الكابلات المعزولة بالمواد البوليمرية
٥٨	كابلات البولي فينيل كلورايد
٥٨	كابلات البولي إيثيلين التشابكي
٦٦	الباب الخامس - الخواص الكهربائية للكابلات
٦٦	الكابل ذو القلب الواحد
٦٦	مقاومة الموصل
٧٢	سعة الكابل
٧٣	مقاومة العازل
٧٤	زاوية فقد العازل
٧٧	تدرج السعة
٨٠	تأثيرات الغلاف

٨٣	الدائرة الكهربائية المكافئة للكابل
٨٦	المعاوقات التساهمية
٨٨	الكابل ثلاثي القلوب
٨٨	مقاومة الموصل
٨٨	سعة الكابل
٩١	المعاوقات التساهمية
٩٢	المجال الكهربائي في الكابلات ذات الشريط
٩٥	الباب السادس - اختيار الكابل
٩٥	تكوين الكابل ونوعه
٩٧	قدرة حمل التيار
١١٠	تيار القصر
١٢٤	هبوط الجهد
١٢٥	الباب السابع - الاختبار والمواصفات
١٢٥	الأبعاد
١٢٩	مقاومة وسعة العازل
١٢٩	زاوية فقد العازل
١٣٠	اختبار الجهد الدفعي
١٣١	اختبار الثني
١٣٢	اختبار الجهد العالي
١٣٥	اختبار إبطاء اللهب ومقاومة الحريق
١٣٦	الاختبارات النوعية للكابلات البوليمرية (اختبار المصنع)
١٣٧	الاختبارات النوعية لكابلات العوزال الورقية (اختبار المصنع)
١٣٩	اختبار الموقع
١٤٠	المواصفات
١٤٣	هامش (أ) - بيانات عن الكابلات المعزولة بالورق
١٦٤	هامش (ب) - بيانات عن الكابلات المعزولة بمادة البولي فينيل كلورايد
١٧٣	هامش (ج) - بيانات عن الكابلات المعزولة بمادة البولي إيثيلين التشابكي
١٨٧	هامش (د) - حساب مقاومة الغلاف المعدني
١٨٨	هامش (هـ) - متوسط نصف القطر الهندسي للموصلات المجدولة (نحاس وألومنيوم)
١٨٩	هامش (و) - معاملات التحويل

## تمهيد

يخضع اختيار طريقة نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية - كما هو الشأن في جميع الاختيارات الهندسية - إلى عوامل اقتصادية وعوامل فنية. وتُجرى المقارنة عادة عند اختيار وسيلة النقل والتوزيع بين الخطوط الهوائية Over head lines والكابلات الأرضية Underground cables

تُستخدم خطوط النقل الهوائية على نطاق واسع للنقل والتوزيع في المناطق الريفية والمناطق غير المأهولة وذلك لأسباب اقتصادية بحته. وتُستخدم الكابلات عادة في منظومات التوزيع داخل المنشآت الصناعية وكذلك داخل المدن وفي المناطق المأهولة بالسكان، كما تُستخدم في منظومات النقل على جهد ٦٦ ك.ف.أ. أو أكثر عندما يتعذر النقل بخطوط هوائية بسبب ظروف البيئة أو عندما يكون النقل بخطوط هوائية غير مأمون، كما يفضل - في كثير من الأحيان - استعمال الكابلات لأسباب عديدة منها الأمان وضمان عدم حدوث أعطال أو حوادث أو بالقرب من المطارات وعبر ممرات المياه المتسعة أو في المناطق المحتمل تعرضها لكوارث طبيعية أو أعمال تخريبية. إلا أنه يجب ملاحظة أن تكاليف استخدام الكابلات تكون عادة أعلى من تكاليف الخطوط الهوائية كما أن مصاريف صيانتها وإصلاحها أكبر.

توجد خبرتان رئيسيتان لصناعة الكابلات في العالم، الخبرة الأمريكية والخبرة الأوروبية. ورغم أن مبدأ صناعة الكابلات واحد للخبرتين إلا أن هناك بعض السمات المميزة لكل خبرة، فنجد أن الصناعة الأمريكية لا تفضل

استخدام الورق كمادة عازلة في الكابل وإنما بدأت باستخدام المطاط ثم استخدام المواد المؤلفة Polymeric materials المتوجة من صناعات البتروكيماويات. نجد في نفس الوقت أن الصناعة الأوروبية - وخصوصاً في إنجلترا - استخدمت الورق المشبع بالزيت على نطاق واسع كمادة عازلة في الكابل وذلك منذ بداية هذا القرن وحتى الآن على الرغم من إنتاجها للعديد من أنواع الكابلات ذات المواد المؤلفة.

تُصنف الكابلات في كثير من المراجع تبعاً لجهد التشغيل على أساس جهد منخفض L.V. وجهد متوسط M.V. وجهد عال H.V. وجهد فائق E.H.V. ونحن نوصي بعدم استخدام مثل هذا التصنيف حيث لا يوجد تصنيف عالمي يحدد القيم العددية لحدود هذه الجهود، والأفضل من ذلك هو ما تستخدمه معظم مصانع الكابلات الآن وهو الإشارة إلى جهد الكابل بالكمية  $(U/U_0)$  حيث تشير  $U_0$  إلى الجهد بين الموصل والأرض أثناء التشغيل وتشير  $U$  إلى جهد الموصلات التي يصمم عليها الكابل. تعطى  $U_0$  بالقيمة التأثيرية (r.m.s.) لكل منهما.

تشابه كل الكابلات في أنها تحتوي على موصلات لحمل التيار وعازل محيط بالموصلات ونوع من الغطاء الخارجي لتقديم الحماية الميكانيكية وكذلك الحماية من التآكل والهلل، وذلك لضمان عمل العازل بطريقة جيدة خلال فترة العمر الافتراضي لعمل الكابل.

تصنع الكابلات إما بقلب واحد Single Core أو قلبين أو ثلاثة قلوب وربما أكثر من ذلك. وقلب الكابل عبارة عن موصل يحيط به مادة عازلة تعزله عن باقي القلوب وكذلك مكونات الكابل.

إن المفاضلة بين اختيار كابل وحيد القلب Single-core cable أو كابل عديد القلوب Multicore cable تخضع لعوامل كثيرة منها ما هو فني تقتضيه الظروف للحصول على أداء معين تحت شروط معينة، ومنها ما هو إقتصادي. يمكن القول بصفة عامة أن استخدام الكابلات عديدة القلوب يؤدي إلى خفض تكاليف الكابل وكذلك خفض هبوط الجهد بالإضافة إلى استخدام إقتصادي



أفضل لمجاري الكابلات. وعلى الجانب الآخر فإن استخدام الكابل وحيد القلب يهيء مرونة أفضل وسهولة في التركيب والتوصيل. ولهذا يفضل استخدام الكابلات وحيدة القلب داخل المباني نظراً لكثرة وحدة تعرض الكابل للانحناءات وكذلك كثرة عمل التفرعات والتوصيلات على الكابل.

يشترط في العازل المحيط بالكابل أن تتوفر فيه الخواص الآتية:

- ١ - عمر افتراضي طويل.
- ٢ - شدة عزل كهربية عالية High dielectric strength لفترة طويلة
- ٣ - مقاومة عالية للكورونا (التفريع الهالي) والتأين.
- ٤ - مقاومة لدرجات الحرارة العالية.
- ٥ - مرونة ميكانيكية.
- ٦ - مقاومة للرطوبة.
- ٧ - فقد صغير في العازل.

من المستحيل أن نجد مادة تكون الأفضل في جميع الخواص السابقة. وعلى ذلك فإن اختيار المادة العازلة المناسبة يخضع للمواصفات المطلوب تحقيقها. إننا نجد - على سبيل المثال - أن الورق المشبع بالزيت له أعلى شدة عزل كهربية مع أطول فترة عمر افتراضي بالمقارنة بجميع العوازل الأخرى المستعملة، ورغم ذلك فإنه غير مقاوم للرطوبة كما أنه غير مرن مثل مرونة بعض المواد الأخرى. علاوة على ذلك فإن مادة مثل الأسبستوس تتحمل درجة حرارة أعلى من الورق المشبع بالزيت.

استخدم سيمنز أول كابل معزول بمادة تسمى جتا - برشا عام ١٨٤٧. وتم إنتاج ٣٠٠٠ ميل من هذا الكابل استخدمت في دوائر البرق (التلغراف). ثم استخدمت هذه المادة عام ١٨٨٠ في صناعة كابل لنقل القدرة الكهربائية. ومنذ ذلك الحين استمر التطور في صناعات المواد العازلة للكابلات وكذلك في تحسين الخواص الكهربائية والميكانيكية لمكونات الكابلات والمواد الداخلة في تركيبه. ونحن نجد الآن كابلات تعمل في نقل كميات هائلة من القدرة الكهربائية على جهود فائقة وصلت إلى أكثر من ٧٠٠ ك. ف.

يُقسم المهندسون الكابلات عادة إلى ثلاث فئات رئيسية:

- ١ - كابلات التمديدات المرنة Wiring cables
- ٢ - الكابلات المستخدمة في التغذية والتوزيع Supply distribution cables
- ٣ - كابلات النقل Transmission cables وهي الكابلات التي تستعمل في نقل الكميات الكبيرة من القدرة الكهربائية وتعمل عادة على جهود ٦٦ ك ف. وأعلى من ذلك حتى حوالي ٧٠٠ ك ف.

سوف نركز في كتابنا هذا على كابلات الفئتين الأولى والثانية حيث أنها متشابهة في الخواص والتركيب والتشغيل. أما كابلات النقل على جهود عالية فإن بها اختلافات جوهرية ليس مجالها هذا الكتاب.

## المواد المستعملة في صناعة الكابلات

نحتاج صناعة الكابلات إلى استخدام مواد كثيرة ومتنوعة. كما أن طرق جميع وصناعة الكابلات عديدة هي الأخرى. تشترك أغلب الكابلات في أن بها مكونات أساسية يمكن تلخيصها فيما يأتي :

### أ - الكابلات وحيدة القلب

- ١ - الموصل.
- ٢ - العازل.
- ٣ - الغطاء والحماية الخارجية.

### ب - الكابلات عديدة القلوب

- ١ - الموصل.
- ٢ - عازل الموصل.
- ٣ - مادة حشو.
- ٤ - سير أو حزام Belt لربط موصلات الكابل وعوازلها.
- ٥ - ستارة Screen حول كل عازل موصل أو حول العوازل كلها معاً.
- ٦ - الغطاء والحماية الخارجية.

تجدر الإشارة هنا أنه ليس من الضروري وجود كل هذه المكونات في نفس الكابل كما سيأتي بيانه على التفصيل فيما يلي :

## أولاً: قلب الكابل - الموصل Core - Conductor

قلب الكابل هو المادة الموصلة الحاملة للتيار. ويجب أن تكون معزولة عن باقي مكونات الكابل. ويتكون القلب عادة إما من سلك واحد ويسمى موصل مصمت Solid Conductor أو من عدد من الأسلاك المجدولة معاً ويسمى موصل مجدول Stranded Conductor.

يُستخدم النحاس والألومنيوم عادة في صناعة موصلات جميع كابلات القوى الكهربائية. توجد بعض أنواع الكابلات الخاصة تستعمل موصلات الصوديوم.

يفضل عادة استخدام موصلات النحاس بسبب توصيليتها Conductivity الأعلى وكذلك بسبب الخواص الميكانيكية والكيميائية الأفضل للنحاس، إلا أن موصلات الألومنيوم تُستخدم أيضاً على نطاق واسع بسبب رخصتها وخفض وزن الألومنيوم بالنسبة للنحاس وذلك لنفس قيمة التيار المار في الكابل. يعطي الجدول ٢ - ١ أهم الخواص الكهربائية للمعادن الداخلة في صناعة مكونات الكابلات.

### ١. الموصلات النحاسية Copper conductors

حددت اللجنة الدولية الكهروتقنية IEC المقياس العالمي لمقاومية النحاس Resistivity المخمَّر (الملدن) Annealed على أساس أن نحاساً مقاومته ١,٧٢٤ ميكروأوم. سم عند درجة حرارة ٢٠°م تكافئ مقاومة مقدارها ١٠٠٪

تُستعمل موصلات نحاسية دائرية مصممة حتى مساحة مقطع ١٦ مم<sup>٢</sup> على الأكثر، كما تستعمل الموصلات النحاسية المجدولة. يجب استعمال الموصلات المصممة في الحالة المخمرة حتى لا تكون شديدة الصلابة. تتكون الموصلات المجدولة من مجموعة من أسلاك دائرية صغيرة ملتصقة معاً على بعضها في طبقات متمركزة. يجب أن يتم الجدول بدرجة عالية جداً من الدقة،



حيث يجب توفير أقصى قدر ممكن من المرونة وقابلية للانحناءات الشديدة نظراً لتعرض الكابل لمثل تلك الانحناءات أثناء عمليات التصنيع واللف على بكرات النقل وكذلك أثناء عمليات تركيب وتوصيل الكابل نفسه.

يصنّع الموصل عادة إما على شكل دائري كما في الشكل ٢ - ١ (أ) وإما على شكل مضغوط Compact (موصل مُشكل) كما في الشكل ٢ - ١ (ب). تمنح عملية تشكيل وضغط الموصل المميزات الآتية للكابل.

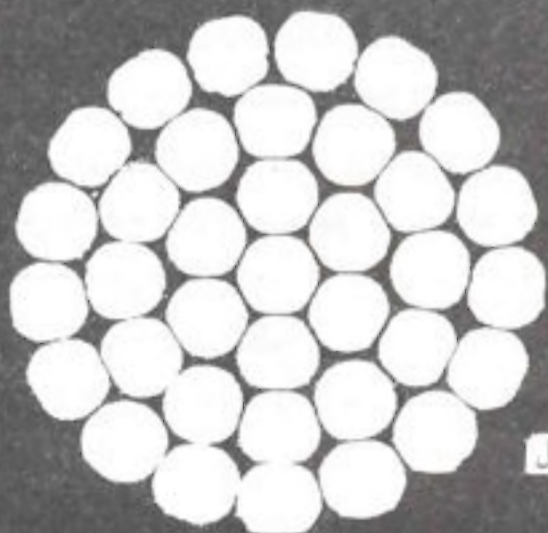
١ - ملاسة ونعومة أكثر لسطح الموصل.

٢ - أبعاداً أقل للموصل ومن ثم للكابل كله، كما هو موضح بالشكل ٢ - ٢.

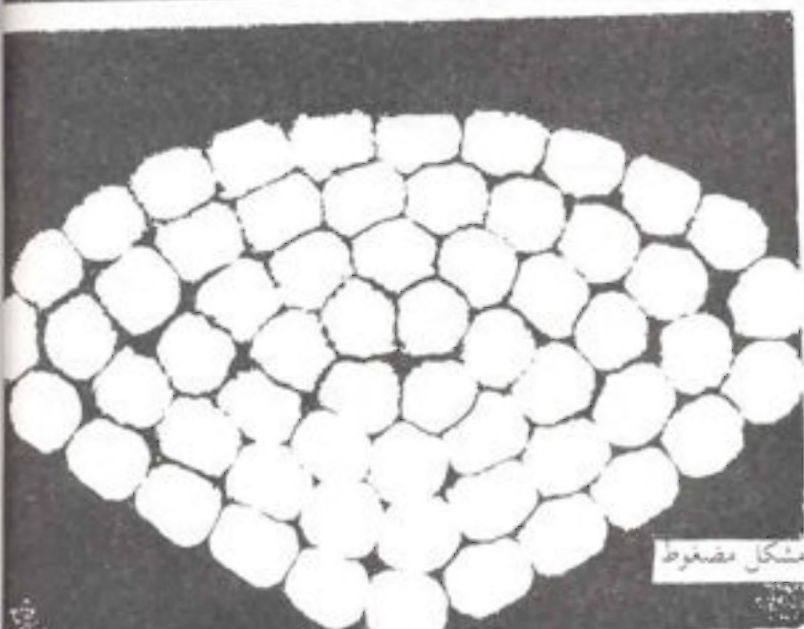
### جدول ١-٢ الخواص الكهربائية للمعادن المستعملة في الكابلات

المعدن	التوصيلة النوعية المقاومة عند ٢٠ م (النحاس ١٠٠) أوم متر × ١٠ <sup>-٨</sup>	المعامل الحراري للمقاومة لكل م عند ٢٠ م
الفضة	١٠٦	١.٦٢٦
النحاس المخمر	١٠٠	١.٧٢٤
النحاس الصلب	٩٧	١.٧٧٧
النحاس المطبق	٩٩.٩٥	١.٨١٤-١.٧٤١
الألومنيوم الطري	٦١	٢.٨٠٣
الألومنيوم (١/٠ صلد - صلد) (H-H)	٦١	٢.٨٢٦
الصبوبوم	٣٥	٤.٩٢٦
الصلب الطري	١٢	١٣.٨٠
الرصاص	٨	٢١.٤

٣ - تحدّد من كمية المادة المشبّعة للورق في كابلات العوازل الورقية، وهذا يساعد على الحد من مشكلة نزيف تلك المادة من مكان إلى آخر داخل الكابل، كما سيأتي توضيحه بالتفصيل فيما بعد.



(أ) موصل دائري غير مشكل



(ب) موصل مشكل مضغوط

شكل ٢ - ١ الموصلات المجدولة في كابلات القوى

توجد عدة تكوينات مختلفة من الموصلات النحاسية المجدولة تنتجها مصانع الكابلات. ينشأ عن عملية الجدول زيادة في القطر الكلي للكابل يعطي الجدول ٢-٢ النسبة في هذه الزيادة. لتعيين قطر الكابل ذي الموصل المجدول

أوجد حاصل ضرب المعامل المناظر من الجدول في قطر موصل مصمت له نفس مساحة مقطع الموصل المجنول.

جدول ٢-٢ معاملات تعيين قطر الكابلات ذات الموصلات المجنولة

عدد الجداول	٣	٧	١٢	١٩	٣٧	٦١	٩١	١٢٧ وأكثر
المعامل	١,٢٤٤	١,١٣٤	١,١٩٩	١,١٤٧	١,١٥١	١,١٥٣	١,١٥٣	١,١٥٤



موصلات دائرية



القطر الكلي



موصلات متشكلة

شكل ٢ - ٢ تقليل أبعاد الكابل  
بتشكيل الموصل

نستعمل في بعض الأحيان موصلات نحاس مكون من أسلاك مقصودة Tuned، تعمل طبقة الفصدير الخارجية الرقيقة الموجودة في السلك النحاسي كحاجز لمنع التفاعلات الكيميائية بين بعض مكونات العوازل المطاطية ونحاس

الموصل. تلاحظ من الجدول ١-٢ أن مقاومة هذا النوع من الموصلات أعلى قليلاً من النحاس المخمر.

## ٢ . موصلات الألومنيوم Aluminium conductors

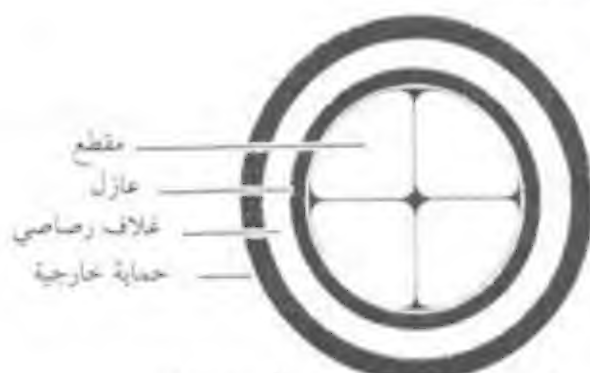
رغم أن الألومنيوم له عدة عيوب فنية بالمقارنة بالنحاس، إلا أنه يمكن في كثير من الأحيان التجاوز عن معظم أو ربما كل هذه العيوب أو حتى الاحتياط لها. ذلك بسبب المكسب المتحصل من رخص ثمن الألومنيوم. يحتاج موصل من الألومنيوم إلى ١,٦ من مساحة موصل نحاسي للحصول على نفس التوصيل الكهربائي. إن هذا يعني استخدام كميات أكبر من مواد العزل والغلاف والتسليح الخارجي لكابلات الألومنيوم. وقد وجد أن استخدام موصلات الألومنيوم في الكابلات المعزولة بالورق ذات الغلاف الرصاصي لا يحقق أي وفر في الوزن الكلي للكابل. كما توجد بعض العوامل الأخرى الواجب أخذها في الاعتبار عند المقارنة بين موصلات النحاس وموصلات الألومنيوم مثل جهد الكابل وقدرة حمل التيار وهبوط الجهد. ويمكن بصفة عامة اعتبار أن مقنن كابل موصل الألومنيوم يساوي ٧٠-٨٠٪ من مقنن كابل موصل نحاسي له نفس الحجم. لا تضاف عادة أي سبائك لمادة موصل الألومنيوم، وبشروط تبعاً لمعظم المواصفات (BS-2627 و BS-3988 مثلاً) على ألا تقل نسبة نقاوة الألومنيوم عن ٩٩,٥٪.

إن أحد العيوب الأساسية في موصلات الألومنيوم هو تكون طبقة رقيقة صلبة من الأكسيد على سطح الموصل. رغم أن هذه الطبقة تهيء حماية معقولة ضد تآكل الموصل، إلا أنها تسبب في العديد من المشاكل خصوصاً عند عمليات اللحام والتوصيل وتثبيت نهايات الكابل. يوجد العديد من الطرق الفنية للتخلص من تلك الطبقة. وتجدر الإشارة هنا إلى وجوب اتباع النشرات الفنية الخاصة بلحام وتوصيل وتثبيت نهايات كابلات الألومنيوم. ويمكن الحصول على تلك النشرات من مصانع الكابلات نفسها. كما أن استخدام موصلات الألومنيوم في كابلات التسليك المرنة Wiring cables غير مرغوب فيه حيث تلجأ في كثير من الأحيان إلى تثبيت موصل السلك بواسطة



مسار من الصلب مما ينشأ عن ذلك وصلة ذات مقاومة عالية تتبعها سخونة وربما غُطِل في الوصلة. جدير بالذكر أن تكاليف عمل الوصلات ونهايات الكابيل من صناديق نهايات وتثبيت وخلافه أكبر في كابلات الألومنيوم عنها في كابلات النحاس، كما أنها تحتاج إلى حجم أكبر.

رغم كل ما سبق، تستعمل موصلات الألومنيوم على نطاق واسع في كابلات القوى نظراً لرخيص ثمنها وتوافر الألومنيوم على المستوى العالمي. تستعمل عادة موصلات دائرية مصمتة حتى ٣٠٠ مم<sup>٢</sup> بينما تستعمل موصلات دائرية ذات أربعة مقاطع للأحجام الأكبر من ذلك كما في شكل ٢-٣. يسمح هذا الشكل بانحناء الكابيل وتحمله للاجهادات الميكانيكية العادية. يُستعمل كذلك موصلات دائرية مجدولة عند الحاجة إلى انحناء أكبر حيث يوجد مثل هذه الموصلات حتى حجم ١٠٠٠ مم<sup>٢</sup>. كما يوجد كابلات ذات موصلات ألومنيوم مشكلة مصمتة ومجدولة.



شكل ٢ - ٣ موصل ألومنيوم دائري ذو أربعة مقاطع

رغم أن الألومنيوم المخمر كلياً يعطي توصيلية جيدة، إلا أنه طري جداً ويسبب مشاكل كثيرة في عمليات التوصيل والنهايات. يستخدم ألومنيوم من نصف صلد إلى  $\frac{1}{2}$  صلد ( $\frac{1}{2}H \rightarrow \frac{1}{4}H$ ).

يجب التأكد بصفة عامة من وجود حماية لموصلات الألومنيوم من التآكل Corrosion ويجب تغطية الموصل دائماً بطبقة حماية خارجية. كما تجدر الإشارة إلى أن الألومنيوم له مقاومة ممتازة للتآكل في الأجواء الجافة فقط داخل المباني. ونظراً لأن الجفاف النام غير مضمون فيجب عدم استخدام موصلات

الومنيوم عارية في أي مكان بل يجب تغطيتها بطبقة حماية خارجية.

### ٣ . موصلات الألومنيوم الملبسة بالنحاس

Copper-clad aluminium conductors:

هي عبارة عن قلب موصل من الألومنيوم عليه طبقة سميكة من النحاس ملتصقة به تماماً حيث يتم تلييسها على موصل الألومنيوم باستعمال رابطة فلدية. إن الغرض الأساسي من التلييس النحاسي هو التغلب على المشاكل الناجمة عن عمل وصلات ميكانيكية مع الألومنيوم. يمكن استخدام هذا النوع من الموصلات بنفس طريقة استخدام الموصلات النحاسية. يستخدم هذا النوع من الموصلات على نطاق محدود في بعض الدول مثل الولايات المتحدة والهند حتى مساحة  $\frac{1}{2}$  / ١ مم<sup>2</sup> للسلك المصمت و ١٠ مم<sup>2</sup> للموصلات المجدولة، ويحصر استخدامه في الاستعمالات المنزلية والتمديدات الصغيرة. كما لا يستعمل في كابلات القوى حيث لم يلق إقبالاً حتى الآن في هذا المجال.

### قياس حجم السلك Wire size

يُقصد بحجم السلك مساحة مقطعة عادة. إتفقت معظم الدول على قياس مساحة مقطع الموصل بالمللي متر المربع، إلا أن بعض المنتجين الرئيسيين للكابلات وخصوصاً في الولايات المتحدة واليابان ما زال يستخدم بعض المقاييس الخاصة وأهمها ما يأتي:

أ - المقياس الأمريكي للسلك American wire gage AWG : يستخدم هذا المقياس أداة قياس خاصة لتعيين رقم يدل على مساحة مقطع السلك. تبدأ هذه الأرقام للأسلاك المستعملة في كابلات القوى من 20 AWG وتصل إلى رقم (٤ / ٠) وهو أكبر مقطع يُستعمل فيه هذا المقياس.

ب - الميل الدائري Circular mil : وهو وحدة مساحة تساوي مساحة دائرة قطرها ميل واحد One mil. والميل يساوي ٠,٠٠١ من البوصة، أي ٠,٠٢٥٤ مللي متر. ويمكن استخدام علاقتي التحويل الآتيتين:

$$1 \text{ mil} = 0.0254 \text{ mm.}$$

$$1000 \text{ Circular mil} = 1 \text{ MCM} = 0.5067 \text{ mm}^2.$$

يبيّن الجدول ٣-٢ العلاقات بين المقاييس الأمريكي للسلك AWG والألف مل دائري MCM والملي متر المربع.

جدول ٣-٢ أحجام الموصلات بالوحدات المختلفة

مساحة المقطع مم <sup>٢</sup>	مساحة المقطع Cir. mils	حجم السلك MCM أو AWG
٠,٥١٩	١٠٢٤	٢٠
٠,٨٢٣	١٦٢٠	١٨
١,٣١	٢٥٨٠	١٦
٢,٠٨	٤١١٠	١٤
٢,٦٣	٥١٩٧	١٣
٣,٣١	٦٥٣٠	١٢
٤,١٧	٨٢٢٧	١١
٥,٢٦	١٠٣٨٠	١٠
٦,٦٣	١٣٠٨٠	٩
٨,٣٧	١٦٥١٠	٨
١٠,٦	٢٠٩١٢	٧
١٣,٣	٢٦٢٤٠	٦
١٦,٨	٣٣١٤٣	٥
٢١,٢	٤١٧٤٠	٤
٢٦,٧	٥٢٦٢٠	٣
٣٣,٦	٦٦٣٦٠	٢
٤٢,٤	٨٣٦٩٠	١
٥٣,٥	١٠٥٦٠٠	١/١
٦٧,٤	١٣٣١٠٠	١/٢
٨٥,٠	١٦٧٨٠٠	١/٣
١٠٧	٢١١٦٠٠	١/٤

المواد المستعملة للعزل في كابلات القوى الكهربائية هي الورق والمواد المؤلفة بمضاعفة الأصل (المواد البوليمرية) والمطاط وقماش الكتان المورنش والأسبستوس.

## ١ - عازل الورق المشبع Impregnated-paper insulation

يتميز عازل الورق المشبع بأن له أعلى شدة إجهاد كهربائي Breakdown strength وأكبر هامش يحول Reliability بالإضافة إلى أطول عمر افتراضي بين جميع المواد المستعملة كعوازل في الكابلات. تصنع الكابلات المعزولة بالورق على الأنواع الآتية:

- |                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| أ - عازل مصمت النوع             | Solide-type insulation     |
| ب - مملوء بالغاز تحت ضغط منخفض  | Low-pressure gas-filled    |
| ج - مملوء بالغاز تحت ضغط متوسط  | Medium-pressure gas-filled |
| د - مملوء بالزيت تحت ضغط مرتفع  | High-pressure oil-filled   |
| هـ - مملوء بالزيت تحت ضغط منخفض | Low-pressure oil-filled    |
| و - مملوء بالغاز تحت ضغط مرتفع  | High-pressure gas filled   |

بدأ استخدام الورق كعازل في الكابلات منذ أواخر القرن الماضي ولا يزال يستخدم بنجاح تام حتى الآن. يستخدم العازل الورقي على شكل شريط ذي طبقتين أو ثلاث طبقات وذلك تبعاً لجهد الكابل. وتتراوح سمك الورق من ٦٥ إلى ١٩٠ ميكرومتر تقريباً وتتراوح كثافته من ٦٥٠ إلى ١٠٠٠ كجم/متر<sup>٣</sup>.

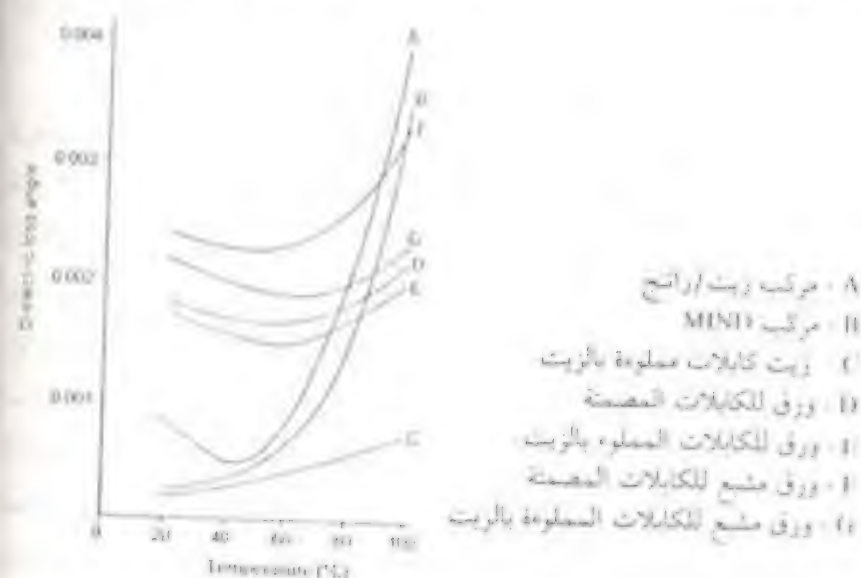
يتراوح السمك الكلي للعازل الورقي في الكابلات من ٠,٦ مم وحتى ٣٠ مم تبعاً لجهد الكابل. كما أن المشاكل التي تظهر نتيجة لزيادة سمك العازل وخاصة أثناء عمليات شوي الكابل تحد من إمكانية زيادة سمك العازل. يجب الاهتمام جيداً بعملية تشطيب العازل الورقي وكذلك قدرة الشد وسمك الشريط حيث يجب زيادتهما على السطح الخارجي للعازل وذلك لاعتبارات ميكانيكية.



ينما يُستخدم ورق أقل سمكاً وذو شدة كهربية أعلى بالقرب من سطح الموصل وذلك للحصول على خواص كهربية أفضل كما سيأتي ذكره في الباب الخامس. ويتم لف موصل الكابل بشرط العازل الورقي حتى الحصول على السمك الكلي المطلوب لعازل الكابل.

رغم أن الورق يمتاز بخواص كهربية جيدة وهو في الحالة الجافة إلا أن طبيعته المسامية تجعله شديد الامتصاص للرطوبة. للتغلب على هذه المشكلة يغمر الورق بعد تحفيقه تحت الحرارة والتفريغ في مركب خاص من مشتقات البترول. ويجب ألا يزيد محتوى الرطوبة في الورق عن ٠,٠١ إلى ٠,٠٥ ٪ تبعاً لجهد الكابل. يضاف إلى زيت التشيع مادة راتنجية في حدود ٢٠ ٪ بغرض رفع لزوجة الزيت في ظروف درجات حرارة التشغيل للحد من نزوح الزيت وحركته داخل العازل علاوة على رفع الشدة الكهربية للعازل وفتح مقاومة أكبر للأكسدة. لا تكفي عملية إضافة المادة الراتنجية لمنع نزوح الزيت داخل العازل من الأجزاء المرتفعة إلى الأجزاء المنخفضة من الكابل بعد تركيبه، وتظهر هذه المشكلة بوضوح في الكابلات الرأسية، تؤدي هذه الظاهرة إلى انخفاض شدة عزل الكابل في الأجزاء المرتفعة منه نتيجة لهجرة الزيت منها، بينما يؤدي تسرب الزيت إلى الأجزاء المنخفضة إلى إجهادات ميكانيكية زائدة على غلاف الكابل قد تؤدي إلى انفجاره (يجب على المهندس مراعاة تلك الظاهرة جيداً عند استعمال كابلات عوازل ورقية في وضع رأسي أو في طرق شديدة الانحدار). ولقد تم التغلب على هذه المشكلة في السنوات الأخيرة بإنتاج نوع من مادة التشيع تعرف باسم «الكتلة المشبعة غير النازحة» (MIND) Mass-impregnated Non-draining وتتكون من الزيت وبعض أنواع الشمع المتبلر مع بعض المواد الأخرى. تتميز هذه المادة بأنها تكون سائلة وقابلة لتشيع العازل أثناء غمره ثم تتحول بالتبريد البطيء إلى مادة صلبة لينة تظل في مكانها بعد ذلك بصرف النظر عن وضع الكابل. رغم أن هذه المادة لا يظهر فيها مشكلة النزح في أحوال التحميل العادية للكابل إلا أنه يجب ملاحظة أن الحرارة الزائدة المستمرة الناتجة من تجاوز الحمل قد تسبب سيولتها وظهور مشكلة النزح مرة أخرى.

يبين الشكل ٢-٤ علاقات نمطية لزواوية فقد العازل  $\delta$  مع درجة الحرارة لأنواع مختلفة من كوابلات العازل الورقي. ويعطي الجدول ٤-٢ السحاحة النسبية، Relative permittivity، لمواد العزل والتشيع المستعملة.



شكل ٢ - ٤ خصائص نمطية للعلاقة بين زاوية الفقد ودرجة الحرارة

جدول ٢ - ٤ السحاحة النسبية لمواد العزل (٥٠)

المادة	٢٠°م	١٠٠°م
مركب الزيت مع الراتنج	٢,٥	٢,٤
الكتلة المشبعة غير النازحة MIND	٢,٤	٢,٢
الكوابلات المملوءة بالزيت	٢,٢	٢,٠٠
الورق المشيع	٣,٣	٣,٣
- كثافة منخفضة	٣,٨	٣,٨
- كثافة مرتفعة		

تتشأ الفقايع الغازية (أو الهوائية) في عازل الكابل إما نتيجة لعب في الصناعة وإما لعب في مادة العازل نفسه. كما أن دورة الحمل أثناء خدمة الكابل Loading cycle لها تأثير على تكوين تلك الفقايع.

يجب أخذ العناية التامة أثناء عملية تصنيع الكابل لتجنب أي فقايع أو احتمال تكون تلك الفقايع فيها بعد. ويجب لذلك إجراء عملية تشيع العازل الورقي بمتهى العناية، ويجب أن يترك ليبرد تماماً قبل عملية تغطية الكابل بالغلاف.

إن دورة تحميل الكابل لها تأثير واضح على تكوين الفقايع الغازية. فعندما ترتفع درجة حرارة الكابل أثناء التحميل الثقيل Heavy loads تتمدد مكونات الكابل ولكن بمعدلات مختلفة حيث يضغط العازل على غلاف الكابل الخارجي بسبب كبر معامل التمدد الحراري للعازل. بعد ذلك، وعند تخفيف الحمل تنخفض درجة حرارة الكابل فينكمش العازل وكذلك ينكمش الغلاف ولكن بمعدل مختلف تاركاً وراءه فراغات غازية أو هوائية وهي ما تسمى بالفقايع. يمكن أن تتكون تلك الفقايع إما في العازل أو في مادة حشو الكابل للكابلات عديدة القلوب. وتؤدي تلك الفقايع إلى زيادة في معامل قدرة الكابل بالإضافة إلى حدوث تآكل داخل مادة الكابل مما يؤثر على شدة العزل الكهربى وزيادة مفقودات الكابل.

### الأنواع الخاصة من كابلات العوازل الورقية

إن الكابلات التي أشرنا إليها حتى الآن تسمى الكابلات المصمتة Solid cables، حيث لا يوجد بها أي وسيلة لمنع تكون فقاعات غازية Voids وكذلك تحلل مواد العزل. تستعمل هذه الكابلات بطريقة حسنة حتى جهد ٣٣ ك.ف.، أما على الجهود الأعلى من ذلك (٦٦ ك.ف. وأكبر) فإن الإجهاد الكهربى مع وجود فقاعات غازية يؤدي إلى حدوث إمهار كهربى يبدأ في الفقاعات نظراً لضعف شدتها الكهربائية. يتم معالجة هذه المشكلة بالوسائل المختلفة الآتية:

- أ - يتم تشيع العازل الورقي بزيت منخفض الكثافة، ويُؤد الكابل بقنوات للزيت داخل الموصل المجدول بجانب القلب المعزول حتى لا تكون هناك فرصة لتكوين فقاعين أو جيوب غازية وذلك تحت الضغط المستمر.
- ب - التأثير يضغط خارجي على الكابلات المصنعة بحيث لا تتكون الفقاعين أثناء تغير دورة الحمل.
- ج - إدخال غاز خامل مثل النيتروجين تحت ضغط (منخفض أو مرتفع) بين العازل والغلاف الرصاصي.

يجب أن يكون الورق المستخدم في مثل هذه الكابلات أكثر مسامية حتى تزيد درجة تشبعه بالزيت أو الغاز المستخدم.

## ٢ - عوازل المواد المؤلفة بمضاعفة الأصل (المواد البوليمرية)

### Polymeric materials

المواد البوليمرية هي مواد مستخرجة من صناعات البتروكيمياويات. يطلق اسم المواد البوليمرية على الأنواع المختلفة من لدائن البوليمر والمطاط الصناعي. تنقسم لدائن البوليمر (البلاستيك) إلى نوعين أساسيين:

- أ - اللدائن الحرارية Thermoplastics، وهي أنواع من اللدائن تليّن بالحرارة وتصلد بالبرودة.
- ب - الجوامد الحرارية Thermosets، وهي اللدائن التي لا تليّن بالحرارة حتى درجة حرارة تحللها.

يمكن صناعياً تحويل العديد من اللدائن الحرارية إلى جوامد حرارية وذلك بإجراء معالجة خاصة عليها تسمى التشابكية Cross-linking.

أهم اللدائن الحرارية المستخدمة في صناعة الكابلات هي:

- أ - البولي فينيل كلورايد PVC Polyvinyl chloride
- ب - البولي إيثيلين منخفض الكثافة LDPE Low density polyethylene
- ج - البولي إيثيلين مرتفع الكثافة HDPE High density polyethylene



Polypropylene

د - البولي بروبيلين PP

Ethylene propylene rubber

هـ - مطاط الإيثيلين بروبيلين EPR

أهم الخواص الحرارية المستخدمة في صناعة الكابلات هي :

Silicone rubber

أ - المطاط السيليكوني SR

Hard ethylene propylene rubber HEPR

ب - مطاط الأيثيلين بروبيلين الناشف

Crosslinked Polyethylene

جـ - البولي إيثيلين التشابكي XLPE

يبيّن الجدول ٥٠٢ أهم الخواص الكهربائية للبوليمرات، وبين الجدول ٥٠٣

أهم الخواص الميكانيكية والفيزيائية لها.

جدول ٥٠٢ الخواص الكهربائية للبوليمرات

tan δ	المقاومة عند ٢٠°م (أوم متر)	المساحة السطحية عند ٥٠ هرتز	المادة
٠,١٣ - ٠,٠٧	٧ - ٥	٧ - ٥	البولي فينيل كلوريد PVC
٠,٠٠٠٣	٢,٣٥	٢,٣٥	البولي إيثيلين منخفض الكثافة
٠,٠٠١٦	٢,٣٥	٢,٣٥	البولي إيثيلين مرتفع الكثافة
٠,٠٠٠٥	٢,٣٥	٢,٣٥	البولي بروبيلين
<b>الخواص الحرارية</b>			
٠,٠٣ - ٠,٠١	٤,٥ - ٣	٤,٥ - ٣	مطاط الأغراض العامة
٠,٠٢ - ٠,٠١	٤ - ٣	٤ - ٣	مطاط مقاوم للحرارة
٠,٠٣٥ - ٠,٠١٥	٤ - ٤	٤ - ٤	مطاط مقاوم للحريق
٠,٠٢ - ٠,٠٠٢	٣,٥ - ٢,٩	٣,٥ - ٢,٩	مطاط سيليكوني
٠,١٩	٣,٢	٣,٢	مطاط الإيثيلين بروبيلين الناشف
٠,٠١٥ - ٠,٠٠٠٤	٥,٢ - ٢,٣	٥,٢ - ٢,٣	البولي إيثيلين التشابكي

## جدول ٦-٢ الخواص الميكانيكية والفيزيائية للبوليمرات

المادة	أقل قدرة للشد Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	الاستطالة عند الشد (%)	حدود درجة الحرارة °م المقنن التركيب	اللدائن الحرارية
البولي فينيل كلورايد	١٢.٥ - ١٨.٥	١٢٥	٧٠ - صفر	
البولي إيثيلين منخفض الكثافة	٧	٣٠٠	٧٠ - ٦٠	
البولي إيثيلين مرتفع الكثافة	٣٧	٥٠٠	٨٠ - ٤٠	
البولي بروبيلين	٣٧	٤٠٠	٨٠ - ١٠	
البوليمرات الحرارية				
مطاط الأغراض العامة	٥	٢٥٠	٦٠ - ٤٥	
مطاط مقاوم للحرارة	٤.٢	٢٠٠	٨٥ - ٤٥	
مطاط مقاوم للحريق	٥.٥	٢٠٠	٨٥ - ٣٠	
مطاط سيليكوني	٥	١٥٠	١٥٠ - ٥٥	
مطاط الإيثيلين بروبيلين الناعف	٨.٥٠	٢٠٠	٩٠ - ٤٠	
البولي إيثيلين التشابكي	١٢.٥	٢٠٠	٩٠ - ٤٠	

### ١. اللدائن الحرارية:

بدأت محاولات استخدام اللدائن الحرارية في الثلاثينات من هذا القرن، وقد تمت تجربة أول كابل معزول بمادة PVC في ألمانيا في ذلك الوقت، إلا أنه لم يتم إنتاج واستعمال عوازل PVC إلا في أواخر الخمسينات.

### أ - البولي فينيل كلورايد PVC

يتميز PVC بخواص كهربية ممتازة عند الجهود المنخفضة وكذلك درجات الحرارة المنخفضة، وهو يستعمل كعازل جيد في الكابلات حتى جهد ٣,٣ ك.ف، إلا أنه يصبح غير مناسب للجهود الأكبر من ذلك حيث ترتفع مفقودات العزل بسبب ارتفاع قيمة ثابت العزل. من الملاحظ أيضاً أن مقاومة PVC تتغير تغيراً شديداً مع درجة الحرارة مما يجعله عند درجات حرارة مرتفعة

غير مناسب بالمرة حيث تهبط مقاومة العازل عند  $70^{\circ}\text{C}$  إلى ألف مرة من قيمتها عند  $20^{\circ}\text{C}$ . علاوة على ذلك فإن PVC يلين بالحرارة ويصلد بالبرودة، ولهذا يجب ألا يتعرض لدرجات حرارة مستمرة تزيد عن  $70^{\circ}\text{C}$  أو تقل عن  $0^{\circ}\text{C}$ ، كما يجب ألا تزيد درجة حرارة الموصل عن  $150-160^{\circ}\text{C}$  أثناء فترة القصر وإلا تلف العازل. تختص مادة PVC بخاصية الإطفاء الذاتي للهب، فهو يحترق عندما يلامس اللهب مباشرة ثم ينطفئ عند إبعاد مصدر اللهب، إلا أنه ينتج غازات سامة وخطرة عند اشتعاله.

أمكن في السنوات الأخيرة إنتاج أنواع أخرى من مادة PVC بهدف تحسين خواصها الكهربائية والحرارية، حيث أمكن إنتاج مادة PVC يمكن تشغيلها على جهود أعلى من 3.3 ك ف ودرجات حرارة أعلى. تُستخدم مثل هذه الأنواع من PVC كغلاف لعازل من مادة جامدة حرارياً حيث تتعرض لدرجات حرارة عالية. علاوة على ذلك فقد أمكن إنتاج أنواع خاصة من مادة PVC تحتفظ بمرونة معقولة حتى  $-40^{\circ}\text{C}$ . جدير بالذكر أن معظم المستهلكين لا يزالون يفضلون استخدام الجوامد الحرارية على PVC في مثل تلك الظروف الخاصة.

تشرط المواصفة (ICE - 502) أنه عند استخدام البوليمرات في الكابلات على جهود أعلى من 3 ك ف يجب أن يقل حاصل الضرب  $(\tan \delta \cdot \epsilon)$  عن  $0.75$ ، بين درجة حرارة  $85^{\circ}\text{C}$  ودرجة حرارة الوسط. إن السبب في ذلك هو أنه عند تعرض الكابل لجهد  $U_0$  بتردد  $f$  وهو غير محمل فإن العازل يسخن نتيجة لمفقودات العزل حتى وإن كان الكابل غير محمل.

إن أقصى درجة حرارة مستمرة يمكن أن يتحملها عازل PVC المستعمل في كابلات الجهد المنخفض (حتى 3.3 ك ف) هي  $70^{\circ}\text{C}$ . بعد هذه الدرجة يصبح PVC غير مستقر حرارياً نظراً لانخفاض الحاد في مقاومته والارتفاع الشديد في زاوية فقد العازل  $\delta$  حيث ينتج عن ذلك زيادة مضطربة في درجة حرارة العازل تنتهي بالتلف التام للكابل. أما بالنسبة لكابلات PVC المستعملة على جهود أعلى من 3.3 ك ف فيمكن لمادة العازل أن تعمل بطريقة سليمة حتى درجة حرارة  $80^{\circ}\text{C}$  تقريباً.

يتميز البولي برويلين بأن درجة حرارة إنصهاره تزيد عن  $160^{\circ}\text{C}$ ، وهي درجة حرارة عالية بالمقارنة بالبولي إيثيلين، إلا أنه لم يستعمل بكثرة في صناعة الكابلات حتى الآن.

### ج - البولي إيثيلين PE

يوجد نوعان أساسيان من البولي إيثيلين، بولي إيثيلين مرتفع الكثافة HDPE وبولي إيثيلين منخفض الكثافة LDPE. إن الخواص الكهربائية للبولي إيثيلين أقل بصفة عامة من البولي فينيل كلورايد، ولذا فهو لا يستعمل كعازل عادة على نطاق واسع في صناعة الكابلات. ينحصر استخدام HDPE تقريباً في مواد الحماية الخارجية للكابل.

يتأثر البولي إيثيلين بالتصاقه مع موصلات النحاس وسنائر الكابل المعدنية نتيجة للأكسدة الناتجة في المعدن، ولذا يجب استعمال مانع للأكسدة عند استعماله كعازل في الكابل. تتراوح درجة إنصهار البولي إيثيلين منخفض الكثافة من  $100^{\circ}\text{C}$  إلى  $115^{\circ}\text{C}$  ويبدأ في اللين من  $80^{\circ}\text{C}$  إلى  $90^{\circ}\text{C}$ . ولهذا يجب ألا يتعرض لدرجة حرارة مستمرة تزيد عن  $70^{\circ}\text{C}$ . يلين البولي إيثيلين مرتفع الكثافة عند درجة حرارة أعلى من  $115^{\circ}\text{C}$ .

### د - النايلون Nylon

يُعتبر النايلون من اللدائن الحرارية الصلبة نوعاً ما، إلا أنها مادة قاسية Tough جداً، كما يتميز بمقاومته الشديدة للاحتكاك بالمواد الأخرى كما أنه لا يلين حتى حوالي  $200^{\circ}\text{C}$ .

يستخدم النايلون في صناعة بعض الكابلات الخاصة عندما تكون هناك حاجة لمثل تلك الخواص السابق ذكرها.

يمكن صناعة بعض اللدائن الحرارية على شكل شريط أو خيط، ويستخدم البولي برويلين في صناعة الخيوط العازلة، كما تستخدم مشتقات

البولي إيثيلين كشریط للربط في الكابلات عديدة القلوب.

## ii . الجوامد الحرارية:

يوجد نوعان مختلفان من الجوامد الحرارية يستخدمان في صناعة الكابلات، المواد المطاطية التي تتميز بمرونة ذاتية وبعض الخصائص مثل مقاومة الزيوت، والمواد المعرضة للعملية التشابكية Crosslinking التي تكسب المادة مقاومة أكبر لدرجات الحرارة المرتفعة.

### أ - المطاط Rubber

يستعمل المطاط الطبيعي المستخرج من الأشجار على نطاق ضيق الآن في صناعة الكابلات. وخواصه بصفة عامة أقل من خواص المواد البوليمرية حيث أقصى حرارة تشقيل له حوالي ٦٠°م.

يعتبر مطاط البتيل Butyl rubber من أشهر أنواع المطاط الصناعي. وقد استخدم على نطاق واسع في صناعة كابلات السفن نظراً لمقاومته للزيوت والشحوم التي تكون موجودة عادة داخل السفن. كما استخدم مطاط البتيل (IIR) في كابلات الجهد العالي بسبب مقاومته العالية لغاز الأوزون والعوامل الجوية بصفة عامة. إلا أنه قد استحدثت في الفترة الأخيرة أنواع أخرى تتميز على مطاط البتيل وبدأ استعماله في الانحصار.

يستخدم مطاط الإيثيلين بروبيلين كمادة عازلة وكحماية خارجية للكابلات وخصوصاً تلك التي تعمل على جهود أعلى من ٣ ك.ف. وهو يتميز بأن له خواصاً كهربية ممتازة وكذلك بمقاومة عالية لغاز الأوزون مما جعله مناسباً في كابلات الجهد العالي، إلا أنه قابل للاشتعال مثل المطاط الطبيعي. يلزم لذلك تزويد الكابلات المعزولة بمادة EPR بوسيلة حماية خارجية.

### ب - البولي إيثيلين التشابكي XLPE

ربما تكون مادة XLPE هي أشهر الجوامد الحرارية على الإطلاق المستعملة الآن في صناعة الكابلات، كما أن مادة PVC هي أشهر اللدائن



الحرارية. يتم تركيب المادة على موصل الكابيل عن طريق البثق Extrusion وهي في الحالة اللدنة عند درجة حرارة مرتفعة، ثم تُعرض المادة لعدة عمليات كيميائية يسبب عنها تغيير في التركيب الجزيئي لها مما ينتج عنه مادة مرنة قاسية لا تلين بعد ذلك بارتفاع درجة الحرارة.

يستعمل XLPE كعازل في الكابلات حتى درجة حرارة مستمرة للموصل تصل إلى ٩٠°م. كما أن العازل يمكن أن يتحمل درجات الحرارة العالية الناشئة عن تيارات القصور والتي تصل إلى ٢٥٠°م وذلك لفترة زمنية قصيرة لحين عمل أجهزة الحماية الخاصة بالكابيل.

نظراً لارتفاع الشدة الكهربائية لمادة XLPE فقد استخدمت بنجاح في كابلات نقل القوى الكهربائية لجهود تزيد كثيراً عن ٦٦ ك.ف، إلا أنه يجب الأخذ في الاعتبار أن فترة عمل تلك الكابلات لم تتجاوز العشر سنوات في أغلب الحالات ولذلك فهي ما زالت في مرحلة التجربة وجمع المعلومات الخاصة بها أثناء وبعد عمليات تركيبها ووضعها في الخدمة.

### ٣ . عازل الكتان المورنش Varnished-cambrie insulation :

وهو في الواقع عبارة عن نسيج من القطن (وليس الكتان) على شكل شريط يلف لولبياً على الموصل بعد تشبيعه من على جانيه بمادة المورنش العازلة ثم يتم لفه على الموصل بعد ذلك. كما تضاف مادة زيتية أثناء اللف للمساعدة في عمليات ثني الكابل، وكذلك فإن هذه المادة تملأ جميع الفراغات مما يساعد على تحسين خواص العزل.

يتميز عازل الكتان المورنش بمرونة أكبر من العوازل الورقية إلا أنها أقل من عوازل المطاط، كما أن له مقاومة معقولة للرطوبة ولذلك فهو يستعمل في بعض الأحيان بدون غلاف خارجي.

### ٤ . الأسبستوس Asbestos

وهو من المواد المقاومة للحرارة إلى حد كبير، إلا أنه لا يستعمل على جهود أكثر من ٨٠٠٠ فولت نظراً لضعف خواصه الكهربائية. يستخدم

الأسبستوس بمفرده كعازل للكابل على شكل ألياف، وتشبع تلك الألياف أحياناً بمادة مقاومة للحريق، كما توجد أنواع أخرى من الكابلات يستخدم فيها الأسبستوس مع عازل الكتان المورنش على هيئة شريط يلف حلزونياً على الموصل.

### ثالثاً: الغلاف المعدني Metallic sheathing

يُعتبر الغلاف المعدني أمراً ضرورياً في كابلات العوازل الورقية حيث يزود العازل الورقي بحماية ميكانيكية معقولة كما يمنع دخول الماء إليه. لا توجد مثل هذه الضرورة في بعض الكابلات الأخرى مثل كابلات العوازل البوليمرية. تشترط المواصفة (IEEE-502) على ضرورة وجود غلاف معدني للكابلات في الجهود الأعلى من ١ ك.ف. يراعى في تصنيع الكابل أن يلتصق الغلاف المعدني تماماً مع الطبقة الخارجية للعازل. يمكن وضع الغلاف على عازل كل موصل من موصلات الكابل أو على مجموعة عوازل الموصلات كلها أو الفترقتين معاً. يجب أن يكون غلاف الكابل متصلاً كهربياً كوحدة واحدة. يمنح الغلاف توصيلاً أرضياً للكابل بحيث يصبح جهد الغلاف مساوياً للصفر وجهد الموصل يكون مقاساً بالنسبة للغلاف. يُستخدم الغلاف المعدني غالباً لحمل تيار الخطأ الأرضي للكابل في حالة حدوث مثل الخطأ، ويلزم لذلك أن تكون توصيلية غلاف الكابل كبيرة. يُستعمل كلاً من الرصاص وسبائك الرصاص والألومنيوم وسبائك الألومنيوم في صناعة الغلاف.

يتميز الرصاص بسهولة الصنع ومقاومته للتآكل إلا أن خواصه الميكانيكية ضعيفة، يستعمل لذلك بعض سبائك الرصاص لتحسين الخواص الميكانيكية للغلاف.

أمكن استخدام الألومنيوم في صناعة غلاف الكابل حيث أنه أقوى من الرصاص. ولكن نظراً لارتفاع شدة معدن الألومنيوم الميكانيكية فإنه يكون من الصعب التعامل معه خصوصاً عند عمليات ثني الكابل. علاوة على ذلك فإن الاجتهادات الميكانيكية الشديدة الناتجة عن التمدد الحراري في الكابل تؤثر

تأثيراً سيئاً على وصلات الكابيل في حالة استخدام غلاف ألمس من الألومنيوم .  
تم التغلب على هذه المشكلة باستخدام غلاف ألومنيوم معرج Corrugated  
يمكنه امتصاص وتحمل تلك الإجهادات بطريقة أفضل من الغلاف الألمس .

جدير بالذكر أنه من المسموح به استخدام كابلات ذات جهد أعلى من  
١ ك ف بدون غلاف معدني أو أي غطاء معدني آخر وذلك في بعض  
الأغراض الخاصة مثل الموصلات الهوائية المعزولة . كما يمكن استخدام مثل  
هذه الكابلات على مستوى سطح الأرض إذا وُضعت داخل مجرى بعيداً عن  
المواد المعدنية المؤرضة .

#### رابعاً: الحماية الميكانيكية - التسليح Armouring

تُزود كابلات القوى عادة بحماية ميكانيكية لحمل تيار الخطأ الأرضي  
ولإعطاء الكابيل بعض الحماية الميكانيكية ضد الإجهادات التي يتعرض لها  
أثناء عمليات النقل والتركيب ، وكذلك بعد وضعه في الخدمة حيث يكون  
معرضاً للوقوع تحت أحمال كبيرة كمرور السيارات وخلافه . يُستعمل عادة  
طبقتان من شرائط الصلب الطري بسمك يتراوح من ٠,٥ مم إلى ٠,٨ مم تبعاً  
لفطر الكابيل ، وتدهن الشرائط بالبيتومين . توفر هذه الشرائط حماية معقولة  
للكابيل ضد الأحمال الواقعة عليه أثناء خدمته ، إلا أن هذه الحماية تكون غير  
كاملة إذا كان الكابيل مدفوناً على عمق أقل من نصف متر من سطح الأرض .  
ولقد وُجد أن استخدام شرائط الصلب للحماية الميكانيكية يجعل الكابيل غير  
مناسب من حيث قدرته على تحمل إجهادات الشد كما يجعله غير مرن عند  
عملية ثني الكابيل .

توجد خبرة أخرى لعملية تسليح الكابيل وهي استخدام أسلاك من الصلب  
المجلفن أو من سبيكة مكونة من النحاس والسيليكون والمنجنيز . تستخدم  
كذلك أسلاك وشرائط الألومنيوم في عملية التسليح . ويمكن القول بصفة عامة  
أن عملية تسليح الكابيل هي خبرة فنية خاصة بكل دولة أو شركة تقوم بتصنيع  
الكابلات .

## خامساً: الحماية الخارجية Oversheath

الحماية الخارجية للكابل هي طبقة من مادة لها خواص معينة توضع فوق الغلاف أو فوق طبقة تسليح الكابل بحيث تكون طبقة الحماية الخارجية هي آخر طبقة خارجية للكابل لحمايته من البيئة والمواد المحيطة به. المواد المستخدمة عادة في طبقة الحماية الخارجية هي ما يأتي:

- أ - الجوت المشبع بالبيتومين.
- ب - البولي فينيل كلورايد.
- ج - بعض الجوامد الحرارية عند الحاجة لمقاومة ارتفاع درجة الحرارة ومقاومة الزيت وتبطين اللهب Heat, Oil Resistance, Flame Retardant (HOFR).

تزود معظم الكابلات الآن بحماية خارجية. ويجب إعطاء اهتمام خاص بالنسبة للكابلات ذات الغلاف الألومنيوم. ويلزم عمل حماية دقيقة للألومنيوم ضد التآكل والعوامل الجوية ومواد البيئة بصفة عامة. تعمل هذه الحماية للغلاف ولمناطق اللحام والتوصيلات ونهايات الكابلات. وقد لوحظ أن تآكل الألومنيوم يبدأ على شكل ثقب صغيرة في غلاف الكابل سرعان ما تتغلغل إلى داخله وتسبب تلفاً سريعاً للكابل. وتجدر الإشارة هنا إلى وجوب ملاحظة أن وجود معادن أخرى مدفونة تحت الأرض لها أئودية للألومنيوم مثل النحاس والرصاص يساعد على تسارع عملية تآكل الألومنيوم المدفون في باطن الأرض. علاوة على ذلك، يجب مراعاة أن الكابلات المركبة فوق الأرض تكون هي الأخرى معرضة للتآكل بسبب الرطوبة والعوامل الجوية الأخرى خصوصاً عند نقط التثبيت.

إن من أهم المواد المستعملة للحماية الخارجية حتى الآن الجوت المشبع بالبيتومين، ويُستعمل غالباً فوق غلاف كابلات العوازل الورقية واللدائن الحرارية التي توضع بالثق فوق غلاف كابلات العوازل البولييمرية وكذلك في جميع أنواع الكابلات. تتكون الحماية الخارجية للكابلات المسلحة من بطانة

تحت التسليح ثم طبقة أخرى فوق التسليح . يستعمل الجوت بنجاح عادة كنسيج تشيع لحمل البشومين ، إلا أنه لا تفضل هذه الحماية في المناطق الحارة حيث يلى الجوت بسرعة ويتج عن ذلك فساد مادة الحماية الخارجية . إن استخدام مادة PVC أصبح شائعاً على مستوى العالم حيث يتميز بخواص كيميائية جيدة ضد التآكل ومقاومة المवाद الموجودة في التربة وكذلك المواد العضوية والغازية وغيرها . يظهر ذلك بوضوح في الجدولين ٢ - ٧ و ٢ - ٨ . إلا أنه يجب الاحتياط جيداً عند عملية تركيب الكابل حيث أن PVC مادة طرية يمكن أن يحدث بها شرخ أو كسر عند اصطدامها بأي مادة صلبة مثل وقوع حجر على الكابل أثناء تركيبه . عند الحاجة إلى مادة أقوى للحماية الخارجية تستعمل مادة البولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE ، حيث يمكن لهذه المادة تحمل أي صدمة ميكانيكية دون أن تتأثر بها . العيب الوحيد لهذه المادة أنها صلبة لا تساعد في عمليات ثني الكابل ولذلك تستخدم في الكابلات الهوائية المعزولة .

وأخيراً يجب مراعاة إجراء الاختبار اللازم بعد وضع الكابل للتأكد من أنه لم يحدث أي شروخ أو ثلث فيه أثناء عملية التركيب . يمكن إجراء هذه الاختبار تبعاً للمواصفة (IEC-229) أو كما هو مبين في الباب السابع .







إن أشهر الجوامد الحرارية المستعملة للحماية الخارجية في الكابلات المقاومة للحرارة والزيت وإبطاء اللهب هي ما يأتي :

i - المطاط السيليكوني (SR)، ويتميز بمقاومته الممتازة لدرجات الحرارة العالية حتى  $180^{\circ}\text{C}$ ، إلا أن خواصه الميكانيكية ضعيفة ولذلك يضاف إليه بعض المواد للتقوية.

ii - مطاط الكلوروبرين (CR, PCP)، يستعمل عند الحاجة إلى مادة مرنة قاسية.

iii - مطاط البولي إيثيلين الكلوري المكثرت (CSP) وله مقاومة ممتازة للزيت وغاز الأوزون والعوامل الجوية.

iv - المطاط الفلوري وهو مقاوم جيد للزيت على درجات الحرارة العالية.

## الاصطلاحات الأمريكية للمواد البوليمرية المستعملة في الكابلات

تشير صناعات الكابلات الأمريكية للمواد البوليمرية المستعملة في الكابلات والتي تحقق المواصفات الموضوعة من (Underwriters Laboratories) وهي هيئة إختبارات أمريكية، بواسطة حروف بيانها كالتالي :

i - Type T للعوازل المناسبة للاستعمال في الأماكن الجافة فقط.

ii - Type TW, THW, THWN للعوازل المقاومة للرطوبة ويمكن إستعمالها في الأماكن المعرضة للمياه. والنوعان THW, THWN مقاومان للرطوبة وكذلك للحرارة حتى درجة حرارة للموصل تصل إلى  $75^{\circ}\text{C}$ .

iii - Type TBS وهو من عوازل اللدائن الحرارية وبه ألياف خارجية مبسطة للهب، ويستخدم في لوحات التوزيع فقط.

iv - Type TA وهو خليط من عازل اللدائن الحرارية والاسبستوس ويستخدم أيضاً في لوحات التوزيع فقط.

v - Type MTW وهو مقاوم للرطوبة والحرارة والزيت، ويستخدم حتى درجة حرارة  $60^{\circ}\text{C}$  في الأماكن الرطبة و  $90^{\circ}\text{C}$  في الأماكن الجافة.

vi - Type THHN وهو مشابه لنوع THWN إلا أنه غير مقاوم للرطوبة.

vii - Type XHHW وهو من مادة XLPE وتستعمل حتى ٧٥°م في الأماكن المبللة بالماء وحتى ٩٠°م في الأماكن الجافة.

viii - Types FEB, FEPB ويحتويان على عازل الأيثيلين بروبيلين الفلوري ويستعملان في الأماكن الجافة حتى درجة حرارة ٩٠°م وحتى ٢٠٠°م في بعض الحالات الخاصة.

### سادساً: الحشو Fillers

تستخدم مادة الحشو في معظم الكابلات عديدة القلوب. الهدف من عملية الحشو هو ملء الفراغات بين الموصلات للحصول على تكوين مصمت دائري للكابل ككل. المواد المستعملة في الحشو هي الجوت والقطن والأميسوس والمطاط والورق.

## الكابلات المعزولة بالورق

### Paper Insulated Cables

رغم الانتشار الواسع، منذ أوائل السبعينات، في استعمال الكابلات ذات العوازل البوليمرية، إلا أن استعمال الكابلات المعزولة بالورق ما زال شائعاً على نطاق كبير في كثير من الدول وخصوصاً في إنجلترا وبعض الدول الأوروبية. يتميز عازل الورق المشبع بشدة انهيار كهربائي Breakdown strength عالية كما أن أعطاله قليلة بالإضافة إلى طول عمره الافتراضي وخواصه الجيدة في الأداء.

توجد كابلات العازل الورقي على إحدى التكوينات الآتية:

- ١ - كابلات مصممة، وهي التي لا يكون فيها أية وسيلة للتحكم في المادة المشبعة سواء من ناحية حركتها داخل الكابل أو ضغطها وذلك بعد عملية تركيب الكابل وتشغيله.
- ٢ - الكابلات المملوءة بالزيت، وهي كابلات ذات عازل ورقي ولكنها مزودة بوسائل للتحكم في ضغط وحركة زيت التشيع بحيث يمكنه أن يملأ أي فراغ أو فقاعة غازية أو شروخ داخل الكابل.
- ٣ - كابلات الغاز المضغوط، وفيها يوضع العازل في وسط غاز خامل مثل النيتروجين تحت ضغط وذلك لتحقيق نفس الغرض المطلوب من الكابلات المملوءة بالزيت.



تستعمل الكابلات المصممة ذات العازل الورقي (الكابلات الورقية) حتى جهد ٣٣ ك ف بنجاح تام. وهي إما كابلات ذات قلب واحد Single-Core Cables أو كابلات عديدة القلوب (إثنين أو ثلاثة أو أربعة عادة) Multi-Core Cables.

## كابلات القلب الواحد

إن التركيب النمطي للكابل ذي القلب الواحد يتكون من موصل دائري مجدول من أسلاك النحاس أو الألومنيوم. يلف حول الموصل شريط من عازل الورق المشيع بحيث يكون اللف بطريقة حلزونية على الموصل مع ترك فجوة بين كل لفة والتي تليها في نفس الطبقة وذلك حتى لا تتداخل اللفات في بعضها أثناء ثني الكابل مما يسبب تلف العازل. يتراوح عرض شريط اللف الورقي عادة من ١٢ إلى ٢٨ مم، وتتم عملية اللف في عدة طبقات فوق الموصل حتى الحصول على السمك الكلي المطلوب للعازل.

يُغطى العازل الورقي بعد ذلك بغلاف معدني من الرصاص أو الألومنيوم أو سبائك الألومنيوم ثم يزود الكابل بحماية خارجية من مادة البولي فينايل كلوريدا PVC عادة.

يبين الشكل ١-٣ المكونات الأساسية للكابل الورقي ذي القلب الواحد.

## الكابلات عديدة القلوب

ذكرنا في الباب الأول أن استخدام الكابلات عديدة القلوب يؤدي بصفة عامة إلى خفض تكاليف الإنشاء سواء للكابل أو لمجاري الكابلات، كما أن إداؤه أفضل من حيث الهبوط في الجهد بالمقارنة بكابلات القلب الواحد.

الأنواع الأساسية من الكابلات ثلاثية القلوب هي ما يأتي:

١ - الكابل ذو الشريط Belted type cable



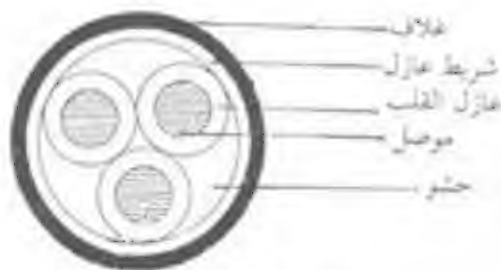
شكل ٣ - ١ كابل ذو عازل ورقي ٦٠٠/١٠٠٠  
قوت قلب مفرد (٣٠٠ مم<sup>٢</sup>)

ب - الكابل ذو الستارة Screened type cable

ح - كابلات SL و SA بالستارة SL, SA Screened type

د - كابلات HSL

بدأت صناعة الكابلات الورقية ثلاثية القلوب بصناعة الكابلات ذي الشريط. يتكون الكابل من ثلاثة موصلات معزولة عن بعضها بحيث يكون لكل موصل العازل الخاص به. يلف الموصلات الثلاثة معاً بعد ذلك بشريط (حزام) Bell من الورق العازل ويُمسك الفراغ المتكون بعازل من الورق أو الجوت. يوضع كل هذا التكوين بعد ذلك داخل غلاف معدني. يبين الشكل ٢-٣ المكونات الأساسية لهذا النوع من الكابلات.



شكل ٣ - ٢ كابل ذو شريط بثلاثة قلوب

مع ارتفاع جهد التشغيل في الكابلات في أوائل هذا القرن، بدأت تظهر بعض العيوب الفنية والمشاكل في الأداء الخاص بالكابلات ذات الشريط. ظهرت هذه العيوب على صورة ضعف شديد وسريع مع إنبهار في خواص العزل. يرجع ذلك إلى شكل توزيع المجال الكهربائي داخل الكابل حيث توجد مركبة للمجال الكهربائي في الاتجاه المماس للعازل مع تغير في مقادير واتجاهات تلك المركبة للقلوب الثلاثة مع الزمن كما سيأتي شرحه فيما بعد في الباب الخامس. أدت تلك المركبة المماسية للعازل إلى عدم قدرة الكابلات ذات الشريط على العمل بكفاءة على الجهود العالية (٣٣ ك ف).

أقترح هوخستادتر Hochstadter عام ١٩١٤ استعمال طبقة رقيقة من المعدن على هيئة ستارة Screen توضع على عازل كل قلب كما هو مبين بالشكل ٣-٣. يعرف هذا النوع من الكابلات أحياناً باسم II-type نسبة إلى مكتشفه. الستارة المستعملة الآن عبارة عن طبقة رقيقة من الألومنيوم المثقب أو شريط رقيق مثقب من النحاس يُلف على العازل مع ترك فجوة صغيرة بين كل لفة والتي قبلها. يمنع وجود هذه الستارة تكوين المركبة المماسية للمجال الكهربائي حيث يلزم أن يكون اتجاه المجال الكهربائي عمودياً على سطح الستارة.



شكل ٣ - ٣ كابل ذو ستارة بثلاثة قلوب

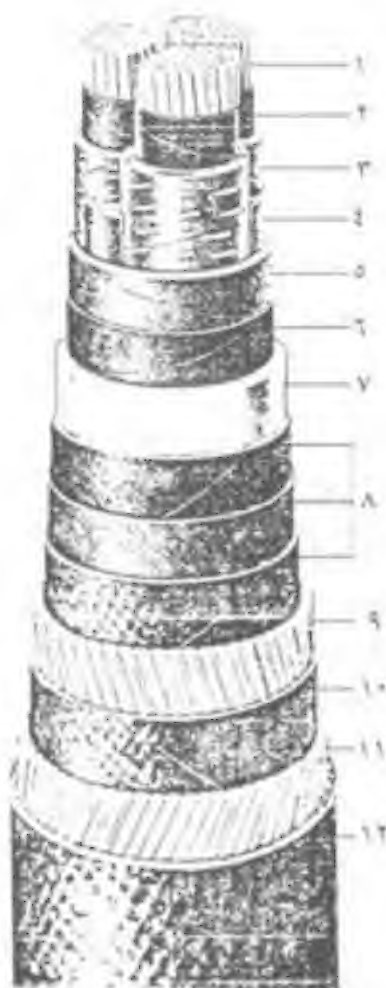
المعدني وبالتالي عمودياً على سطح العازل الملاصق له. ويراعى أن تكون الستارة منسقة جيداً مع العازل وكذلك متصلة اتصالاً كهربياً مع الغلاف ومع ستاري القليلين الآخرين. أمكن بذلك استعمال كابلات العوازل الورقية ذات الستارة على جهود عالية.

تجدر الإشارة هنا إلى أنه من الأنسب استخدام الكابلات ذات الشريط للجهود ١١ ك ف وأقل وذلك لسهولة تكوينها وسهولة تركيبها والتعامل معها ورخص ثمنها بالمقارنة بالكابلات ذات الستارة التي تستعمل للجهود الأعلى من ١١ ك ف عادة.

تم إنتاج نوعين من الكابلات ذات المجال الإشعاعي Radial هما SL و SA. يطلق الرمز SL اختصاراً للتعبير Sheath-lead والرمز SA اختصاراً للتعبير Sheath-aluminium. في هذين النوعين يوضع غلاف منفصل من الرصاص أو الألمنيوم على عازل كل قلب بحيث يصح الكابل كما لو كان ثلاثة كابلات منفصلة كل منها عبارة عن كابل أحادي القلب. يؤدي هذا التكوين إلى تجنب المفقودات المغناطيسية الناشئة في مادة تسليح الكابلات الأخرى. وعلى ذلك يفاضل كثير من مستعملي الكابلات بين استخدام كابلات أحادية القلب وكابلات عديدة القلوب من نوعي SL و SA.

في الكابلات من نوع HSL يغطي عازل كل قلب بستارة تحت الغلاف الخاص به ثم يوضع الجميع داخل غلاف خارجي للكابل كله. ويجب مراعاة الاتصال الكهربى الجيد بين غلاف كل موصل والآخر وكذلك بين أغلفة الموصلات والغلاف الخارجى للكابل.

تبين الأشكال من ٤-٣ إلى ١٠-٣ بعض النماذج لأنواع الكابلات الورقية عديدة القلوب السابق ذكرها. نلاحظ في تلك الأشكال أن موصلات كابلات ١١ ك ف وأكبر يتم لفها عادة بطبقتين من ورق الكربون شبه الموصل أو الورق المعدني وذلك قبل وضع العازل. إن هذا يعمل ستارة واقية للموصل بخفض شدة الإجهاد الكهربى على سطح التلامس بين الموصل والعازل.



شكل ٣ - ٤ كابل ذو عازل ورقي ١١ ك ف بثلاثة قلوب من النوع  
ذو الشريط (١٥٠ مم<sup>٢</sup>)

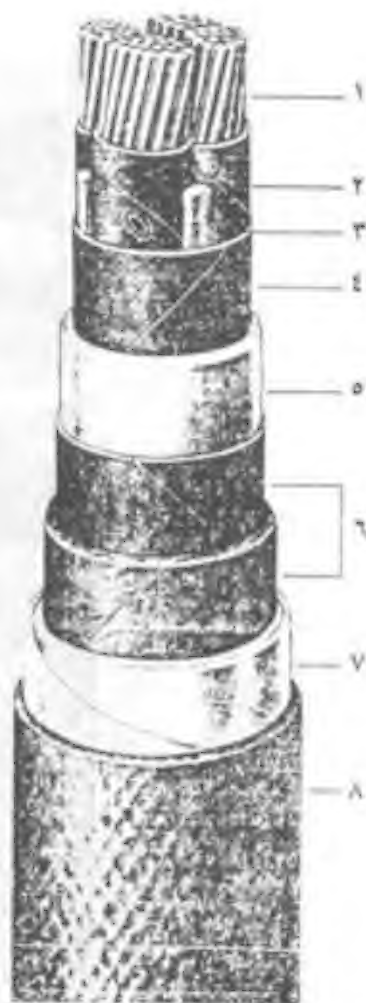
- |                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| ١ - موصل مجدول مشكل  | ٧ - غلاف رصاصي                  |
| ٢ - ستارة ورق كربوني | ٨ - بطانة                       |
| ٣ - عازل ورق مشع     | ٩ - تسليح من سلك الصلب المجلفن  |
| ٤ - حشو              | ١٠ - فاصل                       |
| ٥ - شريط ورق مشع     | ١١ - تسليح من سلك الصلب المجلفن |
| ٦ - ستارة ورق كربوني | ١٢ - الحماية الخارجية           |





شكل ٣-٥ كابل ذو عازل ورقي ١١ ك ف بثلاثة قلوب من النوع ذي الستارة (١٥٠ مم<sup>٢</sup>).

- |                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| ١ - موصل بمحددون مشكل  | ٦ - شريط لحام                 |
| ٢ - ستارة ورق كبريتولي | ٧ - غلاف رصاصي                |
| ٣ - عازل ورق مشبع      | ٨ - بطانة                     |
| ٤ - ستارة معدنية       | ٩ - تسليح من سلك الصلب المخلط |
| ٥ - حشو                | ١٠ - الخراطة الخارجية         |



شكل ٣ - ٦ كابل ذو عازل ورقي ١٠٠٠/٦٠٠ فولت بأربعة قلوب  
من النوع ذي الشريط (٧٠ مم<sup>٢</sup>)

- |                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| ١ - موصل مجدول مشكل | ٥ - غلاف رصاصي           |
| ٢ - عازل ورقي مشبع  | ٦ - بطانة                |
| ٣ - حشو             | ٧ - تسليح من شرائط الصلب |
| ٤ - شريط ورقي مشبع  | ٨ - الحماية الخارجية     |



شكل ٣ - ٧ كابل ذو عازل ورقي ١٠٠/٦٠٠ فولت بأربعة قلوب  
الومنيوم مصنعة من النوع ذي الشريط (٧٠ مم<sup>٢</sup>)

- |                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| ١ - موصل الومنيوم مصمت | ٥ - غلاف رصاصي أو شبكة رصاص |
| ٢ - عازل ورق مشبع      | ٦ - بطانة                   |
| ٣ - حشو                | ٧ - تسليح من شرائط الصلب    |
| ٤ - شريط ورق مشبع      | ٨ - الحماية الخارجية        |



شكل ٣ - ٨ كابل ذو عازل ورقي ٣٣ ك ف ثلاثة قلوب من نوع SL  
(١٥٠ مم<sup>٢</sup>)

- |                            |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| ١ - موصل مجدول دائري       | ٦ - حماية القلب                |
| ٢ - ستارة ورق كربوني       | ٧ - حشو جوت                    |
| ٣ - عازل ورق مشبع          | ٨ - شريط بقلانة                |
| ٤ - ستارة من شريط معدني    | ٩ - تسليح من سلك الصلب المجلفن |
| ٥ - غلاف رصاص أو سبكة رصاص | ١٠ - الحماية الخارجية          |



شكل ٣ - ٩ كابل ذو عازل ورقي من نوع (CONSAC) بثلاثة قلوب  
الومنيوم مصمتة وشرائط

- |                        |                            |
|------------------------|----------------------------|
| ١ - موصل الومنيوم مصمت | ٣ - غلاف الومنيوم          |
| ٢ - عازل ورق مشبع      | ٤ - الحماية الخارجية (PVC) |





- ١ - موصل مجدول
- ٢ - غلاف الومنيوم معرج
- ٣ - الحماية الخارجية (PVC)

٣

شكل ٣ - ١٠ كابل ذو عازل ورقي  
وغلاف الومنيوم معرج

### إعتبارات عامة

عند استعمال الكابلات المصممة المعزولة بالورق يراعى ما يأتي :

- ١ - ألا تزيد الحدود القصوى لدرجة حرارة موصل الكابل عن تلك الواردة بالجدول ١-٣ .

جدول ٢-٣ الحدود القصوى لدرجة الحرارة في الكابلات المعزولة بالورق

الجهد ك ف	تكوين الكابل	التشغيل المستمر	تجاوز الحمل فترة القصير
	م	م	م
١/٠,٦ - ٣,٣/١,٩ - ٦,٦/٣,٨ شريط	٨٠	١٠٠	٢٠٠
١١ - ٦,٣٥ شريط	٦٥	٨٠	٢٠٠
١١/٦,٣٥ - ١٥/٨,٧ ستارة	٧٠	٨٥	٢٠٠
٢٢/١٢,٧ - ٣٣/١٩ ستارة	٦٥	٨٠	١٠٠

٢ - ألا تقل أنصاف اثني عن تلك الواردة في الباب السابع.

٣ - ألا تزيد قوة سحب الشد أثناء عمليات التركيب عن تلك الواردة بالجدول ٢-٣.

٤ - إجراء الاختبارات الخاصة بالكابلات الورقية والتي تُجرى بعد عملية الانشاء و بعد عملية التشغيل، كما هو مبين في الباب السابع.

جدول ٢-٣ أقصى قوى سحب للكابلات الورقية جهد ١١ ك ف

حجم الموصل م <sup>٢</sup>	غلاف ألمس (نيون)	غلاف معرج بماسك للغلاف بدون ماسك للغلاف (نيون)	غلاف معرج بماسك للغلاف بدون ماسك للغلاف (نيون)
٠٩٠	٥٩٠٠	٦٩٠٠	٤٠٠٠
١٥٠	٧٩٠٠	٩٨٠٠	٥٤٠٠
١٨٥	٩٨٠٠	١١٨٠٠	٦٤٠٠
٢٤٠	١٣٧٠٠	١٤٧٠٠	٧٩٠٠
٣٠٠	١٩٦٠٠	١٩٦٠٠	٩٨٠٠

٥ - الاهتمام الخاص بالكابلات الرأسية والموضوعة في وضع مائل وإجراء الاختبارات الدورية عليها. تستعمل كابلات الكتلة المشبعة غير النازحة MIND فقط للكابلات الرأسية.

## الكابلات المعزولة بالمواد البوليمرية

### Polymeric Materials Insulated Cables

إن أكثر المواد شيوعاً في كابلات العوازل البوليمرية هي ما يأتي :

- ١ - البولي فينيل كلورايد PVC
- ٢ - البولي إيثيلين النشائي XLPE
- ٣ - العوازل المطاطية وتشمل مطاط البتيل ومطاط الأيثيلين بروبيلين EPR.

تُعتبر الكابلات المعزولة بمادة PVC هي الاختيار الأفضل في جميع أنحاء العالم وذلك حتى جهد ٣.٣ ك. ف. ورغم وجود كابلات معزولة بعازل PVC مصممة خصيصاً للعمل حتى جهود تصل إلى ٢٠ ك. ف.، إلا أنها لم تلقَ إقبالاً طيباً من المستهلكين حيث يفضل عليها الكابلات ذات الأنواع الأخرى من العوازل مثل XLPE والعوازل المطاطية.

لم يتسبب عن استعمال كابلات PVC منذ الخمسينات وحتى الآن أي مصاعب أو مشاكل في التشغيل العادي. إلا أنه لوحظ أن المادة تفقد قدرًا من لدونتها نتيجة لتعرضها المستمر لدرجات الحرارة المرتفعة والنتيجة من سخونة الموصل. تلاحظ تلك الظاهرة جيداً عند نهايات الكابلات وصناديق التوصيل. ورغم ذلك فإن تلك المشكلة لم تسبب أية متاعب بشرط مراعاة عدم تعرض الكابل للحركة الشديدة أو النقل من مكانه.

ذكرنا في الباب الثاني أن مادة PVC تتأثر تأثيراً شديداً بارتفاع درجات الحرارة وفترة تعرضها لذلك الارتفاع. يجب - نتيجة لذلك - مراعاة تلك

الخاصية بعدم تعريض الكابلات لتجاوزات شديدة في الحمل Overloading أو لفترات قصر طويلة نسبياً. ننصح في هذا المجال بالاهتمام بمراجعة ضغط أجهزة الحماية عند استعمال كابلات PVC ومقارنتها بمقدرة تحمل تيار القصر (يمكن الاستعانة بالبيانات الواردة في الباب السادس في هذا الشأن). قد يستدعي الأمر إما زيادة حجم الكابلات أو خفض مقته. وعلى أية حال فإن هذا الموضوع لا يمكن إعتباره مشكلة كبيرة.

تصنع كابلات PVC بموصلات نحاسية وموصلات الألمنيوم. وتكون الموصلات النحاسية مجدولة عادة بينما تكون موصلات الألمنيوم مصمتة. كما تصنع تلك الكابلات إما وحيدة القلب أو عديدة القلوب.

يحدد سمك العازل في كابلات PVC حتى جهد 3 ك ف بالمتطلبات الميكانيكية كالأحمال الواقعة على الكابلات وغير ذلك مثل عمليات الشني وارتفاع درجة الحرارة. أما للكابلات ذات الجهود الأعلى فيكون العامل المحدد هو العامل الكهربائي.

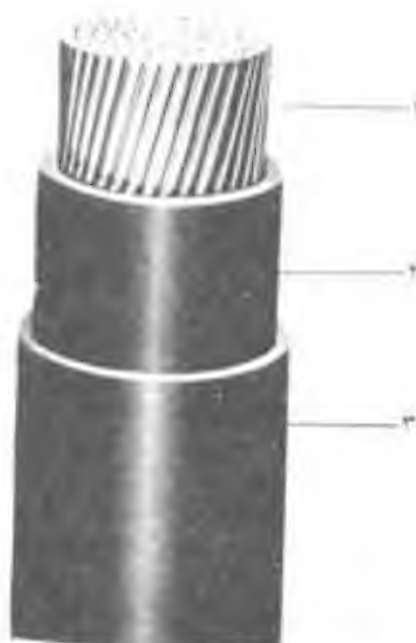
تُرود كابلات PVC عادة بغلاف خارجي غير معدني وهو أيضاً من مادة PVC كما توجد أنواع منها مسلحة بأسلاك من الصلب عادة، على شكل طبقة أو طبقتي تسليح، وتوجد أنواع أخرى غير مسلحة.

نبين الأشكال من ٤-١ إلى ٤-٥ نماذج مختلفة من كابلات عوازل PVC. يجب مراعاة الأتي جيداً عند استعمال كابلات PVC.

- أ - لا يزيد حاصل ضرب السماحية  $\times$  زاوية الفقد عن ٧٥، ٠ بين درجة حرارة ٨٥°م ودرجة حرارة الوسط كما بينا ذلك في الباب الثاني.
- ب - لا تزيد أقصى درجة حرارة تحميل مستمرة عن ٧٠°م
- ج - لا تزيد درجة الحرارة عن ١٢٠°م في فترات التحميل الزائد لحين عمل أجهزة الحماية
- د - لا تزيد درجة الحرارة عن ١٦٠°م أثناء فترات قصر الدائرة.

نوصي بالرجوع إلى المعلومات الواردة في الباب السادس بخصوص تلك

- الاعتبارات. كما توصي بمراعاة ما يأتي بالنسبة لكابلات عازل PVC وذلك أثناء عمليات التركيب وقبل الدخول في الخدمة.
- أ - يراعي ألا تتم عملية التركيب في الأجواء الباردة (حوالي صفر °م) لأن العازل يكون قصيفاً Brittle في تلك الحال وسهل التعرض للتشقق مما يفقده قدرته على العزل.
- ب - مراعاة أقل نصف قطر ثني مسموح به للكابل تبعاً لما هو وارد بالباب السابع.



شكل 4 - ١ كابل ذو عازل PVC ١٠٠٠/٦٠٠ فولت بقلب واحد نحاسي مجدول (حتى ٦٣٠ مم<sup>2</sup>)

- ١ - موصل نحاسي مجدول  
٢ - عازل PVC  
٣ - غلاف خارجي PVC





شكل ١ - ٢ كابل ذو عازل PVC ١٠٠٠/٦٠٠ فولت مسلح بقلب واحد مجدول (حتى ٦٣٠ سم<sup>٢</sup>)

- ١ - موصل نحاسي مجدول      ٣ - تسليح من أسلاك الألومنيوم  
٢ - عازل PVC      ٤ - غلاف خارجي PVC



شكل ٢ - ٣ كابل ذو عازل PVC ١٠٠٠/٦٠٠ فولت مسلح بأربعة قلوب (حتى ٤٠٠ سم<sup>٢</sup>)

- ١ - موصل نحاسي مجدول مشكل      ٣ - بغطاء  
٢ - عازل الموصل      ٤ - تسليح أسلاك الألمنيوم  
٥ - غلاف خارجي PVC



شكل ٤ - ٤ كابل ذو عازل PVC ١٠٠٠/٦٠٠ فولت غير مسلح بأربعة قلوب

- ١ - موصل مجدول مشكل
- ٢ - عازل الموصل PVC
- ٣ - بطانة
- ٤ - حماية خارجية PVC



- ١ - موصل نحاسي مجدول مشكل
- ٢ - عازل الموصل PVC
- ٣ - عازل حراري وربط
- ٤ - غلاف رصاصي
- ٥ - بطانة PVC

شكل ٤ - ٥ كابل ذو عازل PVC ١٠٠٠/٦٠٠ فولت مسلح وبغلاف رصاصي

تعتبر مادة البولي إيثيلين التشابكي XLPE بالخواص الآتية:

- أ - تتحمل درجات حرارة مرتفعة نسبياً سواء أثناء التحميل المستمر أو تجاوز الحمل أو فترات القصر.
  - ب - زاوية فقد العزل لها صغيرة بالمقارنة بمعظم مواد العزل الأخرى.
  - ج - شدة الانهيار الكهربائي لها تتراوح من ٥٠ إلى ٧٠ ك ف /مم وشدة انهيار الجهد الدفعي Ipulse voltage لها تتراوح من ٨٠ إلى ١٦٠ ك ف /مم.
  - د - مقاومة ممتازة للرطوبة.
  - هـ - مقاومته ممتازة لغاز الأوزون المتكون من الكورونا الناشئة نتيجة لزيادة شدة المجال الكهربائي في العازل.
  - و - مادة صلبة جداً، حيث تعتبر مادة XLPE أصلد العوازل المعروفة تقريباً.
- أدت كل هذه الخواص السابقة إلى تفضيل استعمال كابلات XLPE للجهود الأعلى من ٣,٣ ك ف وحتى جهود تصل إلى ٢٧٥ ك ف. كما تستعمل كابلات XLPE للجهود الأقل من ٣,٣ ك ف إلا أن ثمنها أغلى من كابلات PVC.

يتم إنتاج كابلات XLPE عن طريق عملية البثق Extrusion، حيث يتم وضع طبقات الكابل المختلفة حول الموصل بهذه الطريقة. يخضع الكابل أثناء هذه العملية إلى عملية علاج تعرف باسم Curing يستعمل فيها إما بخار الماء أو غاز خامل مثل النيتروجين. تكتسب صناعة الكابل بهذه الطريقة مميزات أساسية له حيث تمنع احتمال وجود شوائب أو فجوات هوائية أو رطوبة قد يتعرض لها الكابل أثناء التصنيع، كما تحقق عملية العلاج تجانساً في مواد الكابل وتقوى الرابطة بين طبقات الكابل وبعضها.

يجب مراعاة ما يأتي عند استعمال كابلات XLPE.

- أ - لا تزيد أقصى درجة حرارة تحميل مستمر عن ٩٠°م للموصل.
- ب - لا تزيد أقصى درجة حرارة تحميل زائد عن ١٣٠°م للموصل.
- ج - لا تزيد أقصى درجة حرارة عن ٢٥٠°م للموصل أثناء فترة القصر.

كما يراعى عند عمليات التركيب أن مادة XLPE مادة صلبة جداً مما يجعلها غير مناسبة للانتحانات الحادة، ونوصي بالرجوع إلى المعلومات الواردة في الباب السابع بهذا الشأن.

يُفضل عادة استخدام كابلات XLPE للجهود الأعلى من ٣,٣ ك ف. وهي شائعة الاستعمال في منظومات التوزيع الأولى على جهد ١١ ك ف. ولا يختلف التركيب الأساسي لمكونات كابلات XLPE عنها في كابلات PVC، وبين الشكل ٤-٦ أحد كابلات XLPE.

تستعمل كلاً من كابلات مطاط الإيثيلين بروبيلين ومطاط البتيل عند الحاجة لخواص معينة متوفرة فيهما، إلا أن الاتجاه السائد هو تفضيل استخدام XLPE في الأحوال العادية.

يجب مراعاة الآتي في كابلات العوازل البوليمرية بصفة عامة:

- أ - لا تتم عملية التركيب في درجة حرارة صفر°م أو أقل للكابلات المعزولة بمادة PVC أو التي تستخدم تلك المادة كحماية خارجية.
- ب - عندما توجد ضرورة لتركيب الكابل في درجات الحرارة الباردة جداً يجب إجراء عملية تسخين للكابل وقياس درجة حرارته بواسطة ترمومتر خاص قبل عملية تناوله.
- ج - يلاحظ أن عملية تسخين الكابل تستغرق ساعات طويلة ويجب أن تتم في غرفة آمنة وتحت إشراف دقيق.
- د - يجب إجراء فحص دقيق للكابل بعد عملية التركيب كما هو موضح بالباب السابع.



شكل ٤ - ٦ كابل ذو عازل XLPE ٢٠/١٢ ك في ثلاثة قلوب

- |                             |                                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| ١ - موصل مجدول مشكل         | ٤ - غلاف فاصل                    |
| ٢ - عازل XLPE               | ٥ - تسليح من أسلاك الصلب المختلف |
| ٣ - شريط نحاسي كغلاف للموصل | ٦ - الحماية الخارجية PVC         |



## الخواص الكهربائية للكابلات

### Electrical Characteristics of Cables

يقصد بالخواص الكهربائية للكابلات ثوابت هذا الكابل مثل مقاومة الموصل ومقاومة العازل وسعة الكابل ومحثاته Inductance بالإضافة إلى بعض الخواص الأخرى مثل المجال الكهربائي داخل الكابل وخلافه .

تختلف الخواص الكهربائية في الكابل وحيد القلب عنها في الكابلات عديدة القلوب، رغم أن قيم هذه الكميات يجب أن تعطى في النشرات الفنية المصاحبة للكابل، إلا أننا سنتقدم في هذا الباب الأساس العلمي لهذه الكميات حتى يمكن حسابها ومراجعتها عند الحاجة وكذلك لإمكان تفسير الظواهر المتعلقة بها.

#### أولاً: الكابل ذو القلب الواحد

##### ١. مقاومة الموصل Conductor resistance

تعتمد مقاومة الموصل على نوع مادة الموصل أو على مقاومة الموصل يعطى الجدول ٢ - ١ مقاومة المعادن المختلفة للتيار الثابت. لإيجاد مقاومة سلك طوله ١ متر ومساحة مقطعه A متر<sup>2</sup> نستخدم العلاقة

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ Ohm} \quad (1.5)$$

حيث  $p$  هي مقاومة الموصل بالأوم متر و  $R$  مقاومته الكلية .

تأثر قيمة المقاومة  $R$  بالعوامل الآتية :

أ - درجة حرارة الموصل ، ويمكن استخدام العلاقة الآتية لتعيين قيمة المقاومة  $R_t$  عند أي درجة حرارة  $t$  بدلة المقاومة  $R_{20}$

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t - 20)] \quad (2-5)$$

حيث  $\alpha_{20}$  هي المعامل الحراري لمقاومة المعدن عند  $20^\circ\text{C}$  وقيمته معطاة في الجدول ١-٢ .

ب - مقاومة التيار المتردد ، تختلف مقاومة التيار المتردد عن مقاومة التيار الثابت لنفس المادة . يرجع ذلك إلى سببين أساسيين هما :

١ - الظاهرة القشرية Skin effect حيث يميل التيار إلى المرور داخل الموصل في الطبقة الخارجية منه تاركاً وسط الموصل وذلك بسبب الفيض المغناطيسي للتيار داخل الموصل نفسه .

٢ - الظاهرة التجاورة Proximity effect وتنشأ هذه الظاهرة عند وجود كابلين متجاورين يقع كل منهما في المجال المغناطيسي للآخر .

تسبب الظاهرتان السابقتان زيادة في مقاومة التيار المتردد عن مقاومة التيار الثابت . يعطي الجدول ١-٥ المقاومة للمعادن المختلفة بالأوم لكل كيلومتر عند  $20^\circ\text{C}$  . كما يعطي الجدول ٢-٥ معاملات التصحيح لدرجة الحرارة الفعلية والمحسوبة من المعادلتين (٣-٥) و (٤-٥) :

للموصل النحاسي :

$$R_{20} = R_t \frac{254.5}{254.5 + t} \frac{1000}{l} \text{ (Ohm/km)} \quad (3-5)$$

للموصل الألومنيوم

$$R_{20} = R_t \frac{248}{228 + t} \frac{1000}{l} \text{ (Ohm/km)} \quad (4-5)$$

حيث  $l$  طول الكابل بالمتر و  $R_t$  و  $R_{20}$  المقاومة بالأوم لكل كيلومتر .

جدول ١-٥ مقاومة المعادن عند ٢٠°م

أقصى مقاومة تيار ثابت			
حجم الموصل مم <sup>2</sup>	نحاس صافي (أوم/كم)	نحاس مطلي بالمعدن (أوم/كم)	الومنيوم (أوم/كم)
٠,٥	٣٦,٠	٣٦,٧	
٠,٧٥	٢٤,٥	٢٤,٨	
١	١٨,١	١٨,٢	
١,٥	١٢,١	١٢,٢	
٢,٥	٧,٤١	٧,٥٦	
٤	٤,٦١	٤,٧٠	٧,٤١
٦	٣,٠٨	٣,١١	٤,٦١
١٠	١,٨٣	١,٨٤	٣,٠٨
١٦	١,١٥	١,١٦	١,٩١
١٥	٠,٧٢٧	٠,٧٣٤	١,٢٠
٣٥	٠,٥٢٤	٠,٥٢٩	٠,٨٦٨
٥٠	٠,٣٨٧	٠,٣٩١	٠,٦٤١
٧٠	٠,٢٦٨	٠,٢٧٠	٠,٤٤٣
٩٥	٠,١٩٣	٠,١٩٥	٠,٣٢٠
١٢٠	٠,١٥٣	٠,١٥٤	٠,٢٥٣
١٥٠	٠,١٢٤	٠,١٢٦	٠,٢٠٦
١٨٥	٠,٠٩٩١	٠,١٠٠	٠,١٦٤
٢٤٠	٠,٠٧٥٤	٠,٠٧٦٢	٠,١٢٥
٣٠٠	٠,٠٦٠١	٠,٠٦٠٧	٠,١٠٠
٤٠٠	٠,٠٤٧٠	٠,٠٤٧٥	٠,٠٧٧٨

أقصى مقاومة تيار ثابت			
حجم الموصل مم <sup>2</sup>	نحاس صافي (أوم/كم)	نحاس مطلي بالمعدن (أوم/كم)	الومنيوم (أوم/كم)
٥٠٠	٠,٠٣٦٦	٠,٠٣٦٩	٠,٠٦٠٥
٦٣٠	٠,٠٢٨٣	٠,٠٢٨٦	٠,٠٤٦٩
٨٠٠	٠,٠٢٢١	٠,٠٢٢٤	٠,٠٣٦٧
١٠٠٠	٠,٠١٧٦	٠,٠١٧٧	٠,٠٢٩١
١٢٠٠	٠,٠١٥١	٠,٠١٥١	٠,٠٢٤٧
١٤٠٠	٠,٠١٢٩	٠,٠١٢٩	٠,٠٢١٢
١٦٠٠	٠,٠١١٣	٠,٠١١٣	٠,٠١٨٦
١٨٠٠	٠,٠١٠١	٠,٠١٠١	٠,٠١٦٥
٢٠٠٠	٠,٠٠٩٠	٠,٠٠٩٠	٠,٠١٤٩
تبعاً للمواصفات (IEC 228) و (BS 6791)			

ملحوظة: يمكن الحصول على قيمة تقريبية لمقاومة التيار المتردد بضرب هذه القيمة

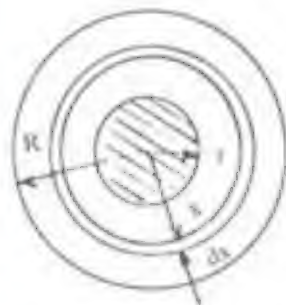
بـ ١.١

جدول ٢-٥ معاملات تصحيح المقاومة لدرجات الحرارة

درجة حرارة الموصل م°	المعامل للتحويل إلى م°٢٠	المقلوب للتحويل من م°٢٠
٥	١,٠٦٤	٠,٩٤٠
٦	١,٠٥٩	٠,٩٤٤
٧	١,٠٥٥	٠,٩٤٨
٨	١,٠٥٠	٠,٩٥٢
٩	١,٠٤٦	٠,٩٥٦
١٠	١,٠٤٢	٠,٩٦٠
١١	١,٠٣٧	٠,٩٦٤
١٢	١,٠٣٣	٠,٩٦٨
١٣	١,٠٢٩	٠,٩٧٢
١٤	١,٠٢٥	٠,٩٧٦
١٥	١,٠٢٠	٠,٩٨٠
١٦	١,٠١٦	٠,٩٨٤
١٧	١,٠١٢	٠,٩٨٨
١٨	١,٠٠٨	٠,٩٩٢
١٩	١,٠٠٤	٠,٩٩٦
٢٠	١,٠٠٠	١,٠٠٠
٢١	٠,٩٩٦	١,٠٠٤
٢٢	٠,٩٩٢	١,٠٠٨
٢٣	٠,٩٨٨	١,٠١٢
٢٤	٠,٩٨٤	١,٠١٦



درجة حرارة الموصل	المعامل للتحويل إلى	المقلوب للتحويل من
م°	م°٢٠	م°٢٠
٢٥	٠,٩٨٠	١,٠٢٠
٢٦	٠,٩٧٧	١,٠٢٤
٢٧	٠,٩٧٣	١,٠٢٨
٢٨	٠,٩٦٩	١,٠٣٢
٢٩	٠,٩٦٥	١,٠٣٦
٣٠	٠,٩٦٢	١,٠٤٠
٣٥	٠,٩٥٣	١,٠٦٠
٤٠	٠,٩٢٦	١,٠٨٠
٤٥	٠,٩٠٩	١,١٠٠
٥٠	٠,٨٩٣	١,١٢٠
٥٥	٠,٨٧٧	١,١٤٠
٦٠	٠,٨٦٢	١,١٦٠
٦٥	٠,٨٤٧	١,١٨٠
٧٠	٠,٨٣٣	١,٢٠٠
٧٥	٠,٨٢٠	١,٢٢٠
٨٠	٠,٨٠٦	١,٢٤٠
٨٥	٠,٧٩٤	١,٢٦٠
٩٠	٠,٧٨١	١,٢٨٠



شكل ٥ - ١ مقطع في كابل وحيد القلب

السعة بين أي سطحين موصلين هي النسبة بين الشحنة الواقعة على أحد السطحين  $q$  وفرق الجهد بينهما  $V$ . يبين الشكل ١-٥ مقطعاً من كابل أحادي القلب. نصف قطر الموصل  $r$  وجهده  $V$ ، ونصف قطر الغلاف  $R$  وجهده صفر. تعمل شحنة  $q$  على متر طولي من الكابل فيضاً كهربياً كثافته  $D$  على بعد  $x$  من مركزه حيث

$$D = \frac{q}{2\pi x} \text{ Coulomb/m}^2 \quad (5.5)$$

شدة المجال الكهربائي  $E$  على بعد  $x$  تعطى بالعلاقة:

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{q}{2\pi \epsilon x} \text{ volts/m.} \quad (6.5)$$

ويمكن الحصول على فرق الجهد بين الموصل والكابل من العلاقة

$$V = \int_r^R -E \, dx$$

$$V = \int_r^R -\frac{q}{2\pi \epsilon x} \, dx$$

$$= -\frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{R}{r} \text{ Volts} \quad (7.5)$$

وبذلك تكون السعة  $C$  هي:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \frac{R}{r}} \text{ Farad/m} \quad (8.5)$$

وبوضع

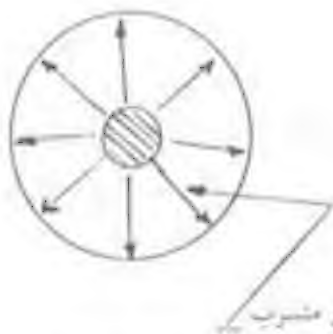
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \frac{\epsilon_r}{36\pi} \cdot 10^{-9}$$

$$C = \frac{\epsilon_r}{18 \times 10^9 \times \ln \frac{R}{r}} \quad \text{F/m} \quad (9-5)$$

$$C = \frac{0.024 \epsilon_r}{\log_{10} \frac{R}{r}} \quad \mu\text{F/km} \quad (10-5)$$

تأثير السحابة النسبية قليلاً بدرجة الحرارة، إلا أنه يمكن إهمال هذا التأثير في ظروف التشغيل العادية.

### ٣. مقاومة العازل Insulation resistance



نظراً لعدم وجود مادة ذات عزل كامل ( $R = \infty$ ) فإنه بمجرد تعريض الكابل للجهد عند طرف الإرسال يتولد فرق جهد بين قلب الكابل وغلافه حتى وإن كان الكابل غير محمل أي لا يمر تيار في موصل الكابل. يمر تيار متسرب في اتجاه شعاعي Radial من الموصل إلى الغلاف كما هو مبين بالشكل ٣-٥. هذا

شكل ٣-٥ اتجاه التيار داخل العازل

التيار يعتبر تياراً متسرباً خلال مقاومة العازل. لحساب تلك المقاومة نعود إلى شكل ٣-٥ ونعتبر قشرة أسطوانية من وحدة أطوال الكابل نصف قطرها  $x$  ومسكها  $dx$ . يمر تيار التسرب عمودياً على مساحة سطح الأسطوانة ( $2\pi x \cdot 1$ ) لمسافة  $dx$  في الاتجاه سريانه ومقاومة هذا المسار هي  $dR$  حيث

$$dR = \frac{\rho dx}{2\pi x} \quad \text{Ohm/m}$$

حيث  $\rho$  مقاومة مادة العازل بالأوم. متر. بإجراء التكامل للحصول على المقاومة الكلية للعازل  $R$

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_1^R \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad \text{Ohm/m.} \quad (11-5)$$

#### ٤ . زاوية فقد العازل $\delta$ Dielectric loss angle

عند التأثير بجهد  $U_0$  بين الموصل والسطح الخارجي للعازل يمر تيار  $I$  من الموصل إلى الغلاف من خلال هذا العازل. هذا التيار له مركبتان،  $I_c$  نتيجة للسعة بين الموصل والغلاف و  $I_R$  نتيجة لمقاومة العازل كما هو موضح بالشكل ٣-٥

$$I_c = \omega C U_0 \quad (12-5)$$

$$I_R = \frac{U_0}{R_i} \quad (13-5)$$

شكل ٣ - ٥ التيار العازلي الكابل

حيث  $C$  سعة الكابل و  $R_i$  مقاومة العازل. من شكل ٣-٥ نجد أن:

$$\cot \phi = \frac{U_0}{R_i} \quad \left( \frac{I}{\omega C U_0} = \frac{I}{\omega C R_i} \right)$$

معامل قدرة الكابل يعطى من العلاقة

$$\cos \phi = \frac{I_R}{I} = \frac{(U_0/R_i)}{I}$$

نظراً لأن القيم الفعلية للزاوية  $\phi$  قريبة جداً من  $\frac{\pi}{2}$  فإن

$$\begin{aligned} \cos \phi &\approx \cot \phi \\ &= \delta = \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) \\ &= \frac{1}{\omega C R_i} \end{aligned}$$

والفقد  $P_d$  في عازل الكابل هو  $U_0^2/R_i$  أي أن

$$\begin{aligned} P_d &= U_0^2 \omega C \tan \delta \\ &= U_0^2 \omega C \delta \end{aligned} \quad (14-5)$$

تعرف الزاوية  $\delta$  بزاوية فقد العازل (DLA). ويجب أن تكون أصغر ما يمكن حتى يمكن تقليل الفقد في العازل الذي يسبب بدوره ارتفاعاً في درجة حرارة الكابل مما يؤدي إلى الحد من قدرة تحميله.

تتأثر زاوية فقد العازل بشدة في الكابلات ذات العازل الورقي حيث تكون حساسة لمحتوى الماء في الورق بحيث تقل كلما كان الورق أكثر جفافاً. كما أن المادة الراتنجية المضافة لزيت التشبيع تجعل  $\delta$  تزيد بسرعة مع زيادة درجة الحرارة (راجع شكل ٤-٢)، ولذلك لا يُفضل استعمال تلك المادة في كابلات الجهد العالي.

٥. شدة المجال الكهربائي Electric stress

يُعطى شدة المجال الكهربائي  $E$  على بعد  $x$  من مركز الكابل بالعلاقة

$$E = \frac{q}{2\pi \epsilon x} \quad \text{V/m.}$$

ويعطى الجهد  $U_0$  بين الموصل والغلاف بالعلاقة

$$U_0 = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{R}{r} \quad \text{V}$$

أي أن العلاقة بين  $E$  و  $U_0$  هي :

$$E = \frac{U_0}{x \ln \frac{R}{r}} \quad \text{V/m} \quad (15-5)$$

وأقصى مجال كهربائي عند  $x = r$  أي عند سطح الموصل

$$E_{\max} = \frac{U_0}{r \ln \frac{R}{r}} \quad \text{V/m} \quad (16-5)$$

وأقل مجال كهربائي عند  $x = R$  أي عند سطح الغلاف الداخلي

$$E_{\min} = \frac{U_0}{R \ln \frac{R}{r}} \quad (17-5)$$



وتكون النسبة بين  $E_{max}$  و  $E_{min}$  هي :

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{R}{r} \quad (18-5)$$



أي أن شدة المجال الكهربائي غير منتظمة داخل عازل الكابل بحيث تكون أكبر ما يمكن على السطح الملاصق للموصل وأقل ما يمكن على السطح الملاصق للغلاف كما هو مبين بالشكل ٤-٥.

شكل ٥ - ٤ المجال الكهربائي في كابل أحادي القلب

تسبب عملية جدد الأسلاك للحصول على موصل الكابل في زيادة شدة المجال الكهربائي على سطح الموصل بنسبة تصل إلى ٢٠٪، ولذلك فإنه من الخبرة المعمول بها في صناعة كابلات الجهد العالي أن يُلقب الموصل المجدول بشرائط معدني أو شبه موصل رقيق للحصول على سطح أملس للموصل بغرض تقليل شدة المجال الكهربائي على سطحه. يمكن الحصول على نصف قطر الموصل الذي يجعل  $E_{max}$  أقل ما يمكن عند قيمة معينة  $V$  من جهد التشغيل وذلك كما يأتي :

نفرض أن نصف قطر الموصل  $r$  (قيمة متغيرة) وأن  $R$  كلاً من نصف قطر الغلاف  $R$  وجهد الكابل  $V$  ثابتان. عندما تكون  $E_r$  أقل ما يمكن فإن

$$\frac{dE_r}{dr} = 0$$

أي أن

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{V}{r \ln (R/r)} \right] = 0$$

ومنها يتج

$$\frac{R}{r} = e = 2.718$$

أي أن نصف قطر الموصل الذي يعطي أقل جهد كهربى عند سطحه يساوي  $R/2.718$  وعندها يكون

$$E_{\max} = \frac{V}{r} \quad (15.5)$$

تجدر الإشارة هنا إلى أن مساحة موصل الكابل تتحدد أساساً بقيمة التيار المطلوب مروره في هذا الموصل، ويحدث في كثير من الأحيان أن تكون مساحة الموصل اللازمة تبعاً للتيار المار أقل من تلك التي يحدث عندها أقل جهد كهربى على سطح العازل الملامس للموصل، يلزم في تلك الحال زيادة سمك العازل للحفاظ على قيمة أقصى جهد. إن زيادة مساحة مقطع الموصل هو حل آخر للمشكلة. ويتم تطبيقه في بعض الحالات كما في حالة الكابلات المملوءة بالزيت ذات العازل الورقى المستعملة في النقل على جهود أكبر من ٦٦ ك.ف.

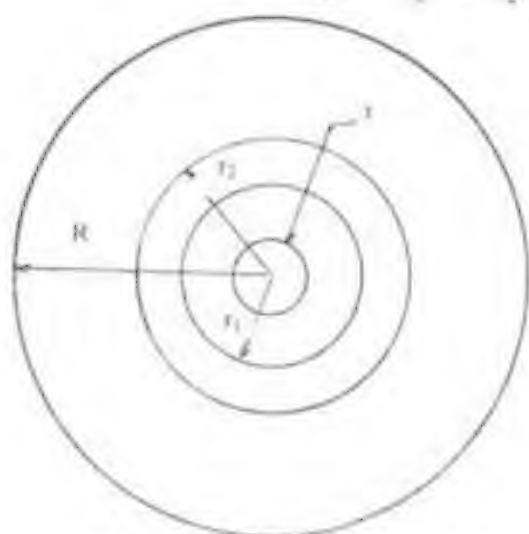
إن ظاهرة عدم انتظام شدة المجال الكهربى داخل العازل تعني أن هذا العازل لم يستغل بالطريقة السليمة. يمكن تحسين كفاءة إستغلال العازل عن طريق استعمال أكثر من طبقة من العازل بحيث تكون الطبقة الملامسة للموصل هي الأعلى في شدة مقاومة الانهيار الكهربى، ونقل تلك الشدة في الطبقات الخارجية. تسمى هذه الطريقة بطريقة تدرج السعة Capacitance grading وتطبق عادة في الكابلات ذات العوازل الورقية كما تم الإشارة إليه سابقاً في الباب الثانى.

### تدرج السعة

تدل المعادلة (٦-٥) على أنه إذا كانت الكمية  $(\epsilon \cdot x)$  ثابتة فإن شدة المجال الكهربى تظل ثابتة خلال العازل، بمعنى أن سماحية العازل تتناسب عكسياً مع البعد من مركز الكابل، إلا أن هذا النوع من العوازل لا يمكن تحقيقه فيزيائياً.

لعل أقرب تفكير لتحقيق أحسن النتائج هو استعمال عدة عوازل متتالية بحيث تقل سماحية كل عازل كلما اقترب من الغلاف وبذلك يمكن أن نجعل

قيم أقصى إجهاد كهربى متساوية في جميع العوازل. بالإشارة إلى الشكل 20-5 نفرض أن السماحية النسبية للعوازل هي  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  و  $\epsilon_3$  لثلاثة عوازل مختلفة وانصاف الأقطار هي كما في الشكل.



شكل 20-5 تدرج السعة في الكابل

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{q}{2\pi\epsilon_1\epsilon_0 x} \\ E_2 &= \frac{q}{2\pi\epsilon_2\epsilon_0 x} \\ E_3 &= \frac{q}{2\pi\epsilon_3\epsilon_0 x} \end{aligned} \right\} \quad (20-5)$$

جهد الكابل الكلي هو  $V$  حيث

$$\begin{aligned} V &= \int_r^{r_1} \frac{q \cdot dx}{2\pi\epsilon_1\epsilon_0 x} + \int_{r_1}^{r_2} \frac{q \cdot dx}{2\pi\epsilon_2\epsilon_0 x} + \int_{r_2}^R \frac{q \cdot dx}{2\pi\epsilon_3\epsilon_0 x} \\ &= \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{R}{r_2} \right] \end{aligned} \quad (21-5)$$

$$C = \frac{q}{V} = 2\pi\epsilon_0 \left[ \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{R}{r_2}} \right] \quad (22-5)$$

ومنها يتبع أن

$$q = \frac{2\pi\epsilon_0 V}{\left[ \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{R}{r_2} \right]} \quad (23-5)$$

وعلى هذا فإن مقدار أقصى إجهاد كهربى في كل عازل هو

$$E_{1max} = \frac{V}{r \left[ \ln \frac{r_1}{r} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \ln \frac{R}{r_2} \right]} \quad (24-5)$$

$$E_{2max} = \frac{V}{r_1 \left[ \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r} + \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \ln \frac{R}{r_2} \right]} \quad (25-5)$$

$$E_{3max} = \frac{V}{r_2 \left[ \frac{\epsilon_3}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r} + \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{R}{r_2} \right]} \quad (26-5)$$

وإذا جعلنا أقصى إجهاد كهربى متساو في الثلاثة عوازل نجد أن

$$\epsilon_1 r = \epsilon_2 r_1 = \epsilon_3 r_2 \quad (27-5)$$

وبتطبيق المعادلة (16-5) على كل طبقة من العازل يتبع

$$\left. \begin{aligned} E_{1max} &= \frac{V_1}{r \ln (r_1/r)} \\ E_{2max} &= \frac{V_2}{r_1 \ln (r_2/r_1)} \\ E_{3max} &= \frac{V_3}{r_2 \ln (R/r_2)} \end{aligned} \right\} \quad (28-5)$$

حيث  $V_1$  و  $V_2$  و  $V_3$  هي الجهود خلال الطبقات الثلاث. وإذا كان

$$E_{1max} = E_{2max} = E_{3max}$$

فإن الجهد الكلي عبر الكابل بين الموصل والغلاف يصبح

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = E_{\text{max}} \left( r \ln \frac{r_1}{r} + r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + r_2 \ln \frac{R}{r_2} \right) \quad (29.5)$$

نبين المعادلة (29.5) إمكانية زيادة جهد التشغيل لنفس الشدة الكهربائية المسموح بها، وذلك على فرض تساوي شدة العزل الكهربائي للطبقات الثلاث، في حالة عدم تساوي الشدة الكهربائية فإن العلاقة الآتية يلزم تحقيقها لجعل أقصى إجهاد كهربائي لكل عازل يتناسب مع شدته الكهربائية.

$$\alpha_1 r_1 E = \alpha_2 r_2 E_1 = \alpha_3 r_3 E_2 \quad (30.5)$$

حيث  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  هي شدة العزل الكهربائي للعوازل ذات السماحية  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  و  $\epsilon_3$  على الترتيب. يبين الشكل ٦-٥ تغير الإجهاد الكهربائي داخل العوازل باستعمال طريقة تدرج السعة. الخط المقطع هو الإجهاد الكهربائي في حال استعمال عازل واحد بسماحية  $\epsilon_1$ .

## ٦. تأثيرات الغلاف Sheath effects

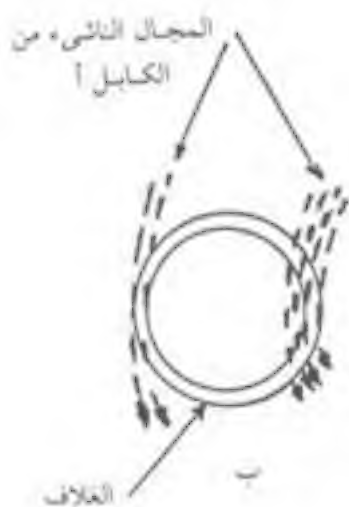
عند مرور تيار في موصل الكابل ذي القلب الواحد فإن هذا التيار يولد حوله مجالاً مغناطيسياً عبارة عن مسارات مغلقة من الفيض المغناطيسي تولد قوة دافعة كهربية بالتأثير في غلاف الكابل نفسه وكذلك في أغلفة الكابلات المجاورة له. هذه القوة الدافعة الكهربية تسبب تيارات تأثيرية يتسبب عنها مفقودات في غلاف الكابل، يمكن أن يتولد نوعان من مفقودات الغلاف كما يأتي:

### أ - مفقودات التيارات الدوامية في الغلاف:

تتولد التيارات الدوامية في غلاف الكابل نتيجة لوجوده بجوار كابل آخر. بالإشارة إلى شكل ٧-٥، عند مرور تيار في موصل الكابل أ يتولد مجال مغناطيسي يقطع غلاف الكابل ب المجاور له بحيث يكون هذا المجال في المقطع من غلاف الكابل ب القريب من الكابل أ أشد من المقطع البعيد عنه. يتولد عن ذلك فرق في الجهد بين مقطعي الغلاف ينشأ عنه تيارات دوامية. ينشأ



شكل ٥ - ٦ تغيير شدة المجال الكهربائي باستعمال تدرج السعة



شكل ٥ - ٧ التيارات الدوامية في الغلاف



عن تلك التيارات مفقودات التيارات الدوامية في الغلاف والتي تعطى بالعلاقة الآتية لثلاثة كابلات متجاورة.

$$S_v = I^2 \left[ \frac{3\omega^2}{R_g} \left( \frac{d_m}{2S} \right) 10^{-8} \right] \text{Watt/km/phase} \quad (30-5)$$

حيث

$S_v$ : مفقودات التيارات الدوامية في الغلاف

1: التيار (أمبير)

$2\pi f$ :  $\omega$

$d_m$ : متوسط قطر الغلاف (متر)

S: المسافة بين مركزي الكابلين (متر)

$R_g$ : مقاومة الغلاف (أوم/كم).

إن هذا النوع من المفقودات صغير جداً بالنسبة لمفقودات الموصل (حوالي ٢٪) ويمكن إهماله عادة إلا في حالة الكابلات ذات الأغلفة الألومنيوم عندما توضع هذه الكابلات قريبة من بعضها.

### ب - مفقودات دائرة الغلاف:

عند توصيل غلاف الكابل بالأرض أو بغلاف كابل آخر في أكثر من نقطة يتولد محيط مغلق Closed loop يحيط بمساحة يخترقها الفيض Flux الناتج من تيار الموصل. يؤدي هذا بدوره إلى تولد قوة دافعة بتأثير المحول Transformer action يعتمد مقدارها على المساحة التي يخترقها الفيض والتي تعتمد بدورها على المسافة بين الكابلات أو بين غلاف الكابل والمسار المتوسط للتيار العائد في الأرض أو أي وسط آخر. يعطي الجهد التآثيري في الغلاف بالعلاقة

$$E_g = I X_{gt} \quad (31-5)$$

حيث I = تيار الموصل

$$X_{gt} = 2\pi f M 10^{-3} \text{ (أوم/كم)}$$

M = الحث المتبادلي بين الموصل والغلاف ويعطي بالعلاقة

$$M = 0.2 \log_e \frac{2S}{d_m} \quad (\text{mH/km}) \quad (32-5)$$

تعطى معاوقة الغلاف  $Z_s$  بالعلاقة

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_{s1}^2} \quad (33-5)$$

وعلى ذلك فإن تيار الغلاف هو

$$I_s = \frac{E_s}{\sqrt{R_s^2 + X_{s1}^2}} \quad (A) \quad (34-5)$$

$$I_s = \frac{IX_{s1}}{\sqrt{R_s^2 + X_{s1}^2}} \quad (35-5)$$

وتصبح مفقودات تيار الغلاف لكل طور هي :

$$I_s^2 R_s = \frac{I^2 X_{s1}^2 R_s}{R_s^2 + X_{s1}^2} \quad (\text{Watt/km}) \quad (36-5)$$

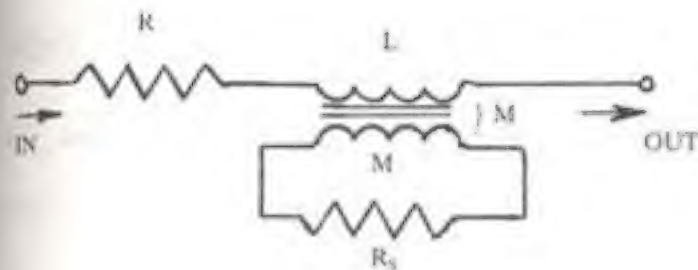
ينتج من التحليل السابق أن مقدار الفقد الكلي في الغلاف الناتج من التيارات الدوامية ودائرة الغلاف هو :

$$I^2 R_s \left[ \frac{X_{s1}^2}{R_s^2 + X_{s1}^2} + \left[ \frac{J_{ac}^2}{R_s^2} \left( \frac{d_m}{2S} \right)^2 10^{-8} \right] \right] (\text{W/km/ph.}) \quad (37-5)$$

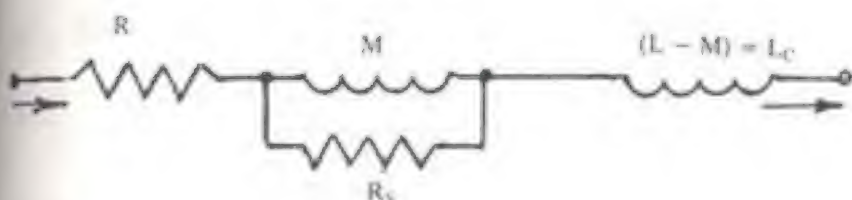
٧ . الدائرة الكهربائية المكافئة للكابل

يبين الشكل ٨-٥ خطوط استيعاط الدائرة الكهربائية المكافئة للكابل كما يأتي :

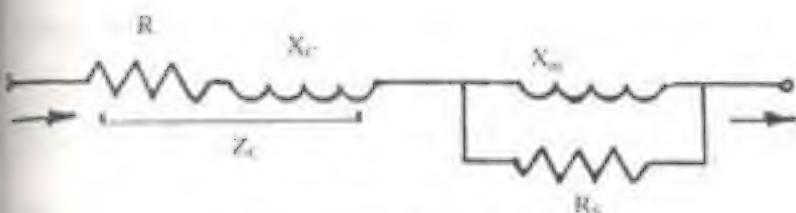
١ - في الشكل ٨-٥ (أ) تظهر دائرة الموصل المكونة من مقاومة الموصل  $R$  والمحثة الذاتية له  $L$  Self inductance ثم دائرة الغلاف المقفلة المكونة من مقاومة الغلاف  $R_s$  ومحثاته الذاتية  $M$ . ويوجد بين الموصل والغلاف حث تبادلي بمعامل حث تبادلي Mutual inductance يساوي المحثة الذاتية للغلاف  $M$  تقريباً.



(أ)



(ب)



(ج)

شكل ٥ - أ الدائرة الكهربية المكافئة للكابل

ii - أمكن تمثيل الدائرة (أ) بواسطة الدائرة (ب) حيث الكمية  $(L-M)$  هي الحث Leakage inductance بين الموصل والغلاف.

iii - يبين الشكل (ج) تحويل هذه المحاثات إلى مفاعلات Reactances.

المعاوقة الكلية لدائرة الكابل (القلب مع الغلاف) هي :

$$\begin{aligned}
 Z &= R + jX_c + \frac{jX_m R_s}{R_s + jX_m} \\
 &= R + jX_c + \frac{X_m R_s (X_m + jR_s)}{R_s^2 + X_m^2} \\
 &= R + \frac{X_m^2 R_s}{R_s^2 + X_m^2} + j \left( X_c + \frac{X_m R_s^2}{R_s^2 + X_m^2} \right) \quad (38-5)
 \end{aligned}$$

يتضح من المعادلة (38-5) أن تأثير وجود الغلاف أدى إلى :

i - زيادة مقاومة موصل الكابل بمقدار

$$\frac{X_m^2 R_S}{R_S^2 + X_m^2} \quad (39-5)$$

ii - أصبحت المفاعلة المؤثرة للكابل هي :

$$X_C + \frac{X_m R_S^2}{R_S^2 + X_m^2} \quad (40-5)$$

بدلاً من مفاعلة الموصل الأصلية X حيث

$$X = \omega L \quad (41-5)$$

من المعادلتين (40-5) و (41-5) نجد أن مفاعلة الكابل قد نقصت بمقدار

$$\begin{aligned} X - \left[ X_C + \frac{X_m R_S^2}{R_S^2 + X_m^2} \right] \\ = X - \left[ (X - X_m) + \frac{X_m R_S^2}{R_S^2 + X_m^2} \right] \\ = \frac{X_m^3}{R_S^2 + X_m^2} \quad (42-5) \end{aligned}$$

لإمكان تجنب تيارات الغلاف العالية والمفقودات المترتبة عليها مما ينتج عنه خفض في قدرة حمل التيار بالنسبة للكابل، تُربط أغلفة الثلاثة كابلات ذات القلب الواحد الحاملة لتيارات الأطوال الثلاثة ربطاً متقاطعاً Cross bonded، بمعنى أن يوصل غلاف الكابل الأول بغلاف الكابل الثاني ثم بعد ذلك بغلاف الكابل الثالث. إن هذا يمنع تيارات الغلاف نظراً لأن جهود الأغلفة الثلاثة مُزاحة عن بعضها بزاوية ١٢٠° وجهد الغلاف يحصر في كل جزء. إن هذا التوضيح مبني على فرض أن الكابلات الثلاثة موضوعة في شكل مثلث مساوي الأضلاع Trefoil. أما إذا وضعت الكابلات على مستوى أفقي في خط مستقيم فإن مفقودات الكابل لن تكون متساوية في الكابلات الثلاثة وستنشأ كمية من الفقد تتقل من كابل إلى آخر.

إن العملية التبادلية Transposition بين الكابلات، وهي العملية المعقدة في خطوط النقل الهوائية تجعل دوائر الغلاف متساوية إلا أنه يظل هناك كمية من الفقد الكلي أكبر بكثير من تلك الناشئة في حالة وضع الكابلات الثلاثة على شكل مثلثي متساوي الأضلاع. ومن هنا نظهر ميزة استخدام هذا الشكل في عملية تركيب الكابلات حيث يجب إتباعه كلما كان ذلك ممكناً.

#### ٨. المعاوقات المتتابعة Sequence Impedances :

نظهر أهمية الحاجة إلى معرفة قيم المعاوقات المتتابعة في فترات التشغيل غير المتماثل الناشئة عادة من حدوث قصر، حيث نستخدم العلاقات الآتية لحساب تيارات القصر:

أ - في حالة قصر بين خط وأرض:

$$I_f = \frac{U}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (A) \quad (43-5)$$

ب - في حالة قصر بين خطين

$$I_f = \frac{U}{Z_1 + Z_2} \quad (A) \quad (44-5)$$

حيث:

$U$ : الجهد الطوري بالفولت.

$I_f$ : تيار الخطأ بالأمبير.

$Z_1$ : معاوقة التابع الموجب بالأوم Positive phase sequence impedance

$Z_2$ : معاوقة التابع السالب بالأوم Negative phase sequence impedance

$Z_0$ : معاوقة التابع الصفري بالأوم Zero phase sequence impedance

إن المعتاد في حالات التعامل مع الكابلات هو طلب قيم تلك المعاوقات من المصانع المنتجة لتلك الكابلات حيث يتم تحديدها عادة بطرق معملية وقياسات لنتائج بعض التجارب عليها. وبصفة عامة يمكن أخذ ما يأتي في الاعتبار.

أ - المعاوقة السالبة (معاوقة التابع السالب) تساوي دائماً المعاوقة الموجبة (معاوقة التابع الموجب).

ب - المقاومة الصفيرية (مقاومة التابع الصفيري) تساوي مقاومة الموصل للتيار المتردد مضافاً إليه التأثير القشري ولا يضاف إليه التأثير التجاوري، ثم يضاف إليه بعد ذلك المقاومة المكافئة للغلاف المعدني في الكابل (جميع الطبقات المعدنية الموجودة في الكابل). يمكن حساب قيمة مقاومة الغلاف المعدني كما هو موضح بالهامش د.

ج - تحسب المفاعلة للتابع الصفيري من العلاقة

$$X_0 = 2\pi f 10^{-3} \left( 0.2 \ln \frac{D}{d} + K \right) \text{ Ohm/Km} \quad (46-5)$$

حيث:

$X_0$ : مفاعلة التابع الصفيري

f: التردد

D: القطر المتوسط للغلاف المعدني (مم)

d: قطر الموصل (مم)

K: ثابت يعتمد على تكوين الموصل ومبين في الجدول ٣-٥.

جدول ٣-٥ قيم الثابت K في المعادلتين (٤٦-٥) و (٥٦-٥)

K	عدد أسلاك الموصل
٠,٠٧٧٨	٣
٠,٠٦٤٢	٧
٠,٠٥٥٤	١٩
٠,٠٥٢٨	٣٧
٠,٠٥١٤	٦١ وأكثر



## ثانياً: الكابل ثلاثي القلوب

### ١ . مقاومة الموصل

لا تتغير قيمة مقاومة الموصل في الكابلات ثلاثية القلب عن قيمتها في الكابلات وحيدة القلب من نفس نوع ومساحة مقطع الموصل وطوله .

### ٢ . سعة الكابل

ندرس في هذا المجال سعة الكابل ثلاثي القلوب ذي الشريط . أما الكابلات الأخرى من الأنواع H و SL و SA و HSL فهي مكافئة تماماً لثلاثة كابلات أحادية القلب من حيث اعتبار السعة وشدة المجال الكهربائي .

لا توجد طريقة سهلة لحساب سعة الكابل ذي الشريط ثلاثي القلوب ، وتعين السعة عادة عن طريق القياس . تجدر الإشارة هنا إلى وجود علاقة تجريبية يمكن بواسطتها حساب سعة الكابل الكلية  $C_0$  بين الغلاف وكل قلب على حدة . تبين المعادلة (47-5) هذه العلاقة

$$C_0 = \frac{0.0299e}{\log_{10} \left( 1 + \frac{T+t}{d} \left( 3.84 - 1.70 \frac{t}{T} + 0.52 \frac{t^2}{T^2} \right) \right)} \mu F/km \quad (47-5)$$

حيث :

$e$  : السماحية النسبية للعازل

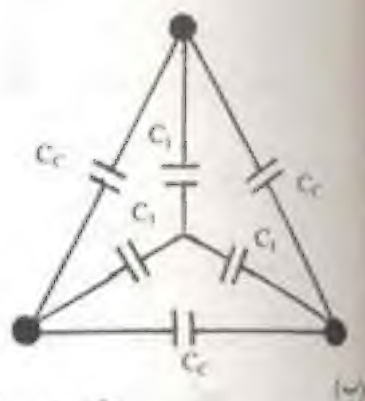
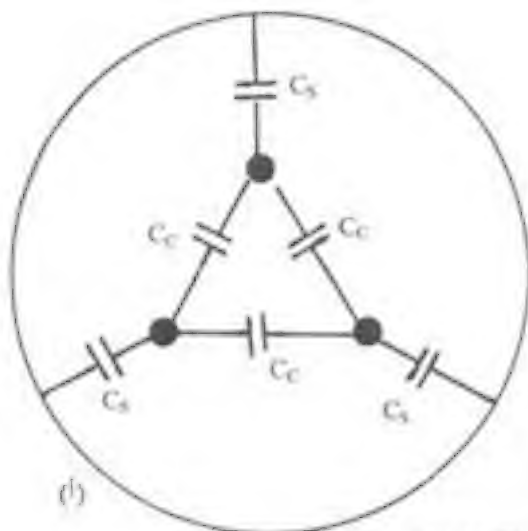
$d$  : قطر الموصل (مم)

$T$  : سمك عازل الموصل (مم)

$t$  : سمك الشريط العازل (مم)

### طريقة القياس

يبين الشكل ٩-٥ (أ) السعات الموجودة في الكابل . توجد سعة  $C_0$  بين كل قلب وبين غلاف الكابل . بالإضافة إلى ذلك ، توجد سعة  $C_c$  بين كل قلب من قلوب الكابل والقلبين الآخرين .



شكل ٥ - ٩ السعات في الكابلات ثلاثي القلوب ذي الشريط

بتحويل شكل الدلتا المكون من الثلاث سعات المتساوية  $C_c$  إلى شكل نجمة Star نجد أن  $C_1 = 3C_c$  كما هو مبين بالشكل ٩-٥ (ب)، وتصبح بذلك السعة الكلية بين الموصل والغلاف هي  $C_0$  حيث

$$C_0 = C_s + 3 C_c \quad (48-5)$$

يمكن بذلك معرفة قيمة  $C_0$  بتحديد قيمة كل من  $C_c$  و  $C_s$  كما يأتي :

أ - نصل أي قلبين بغلاف الكابلات ثم نقس السعة بين القلب الثالث والغلاف، ولتكن  $C_s$ . الشكل ١٠-٥ يوضح ذلك، ونجد أن

$$C_s = 2 C_c + C_s \quad (49-5)$$

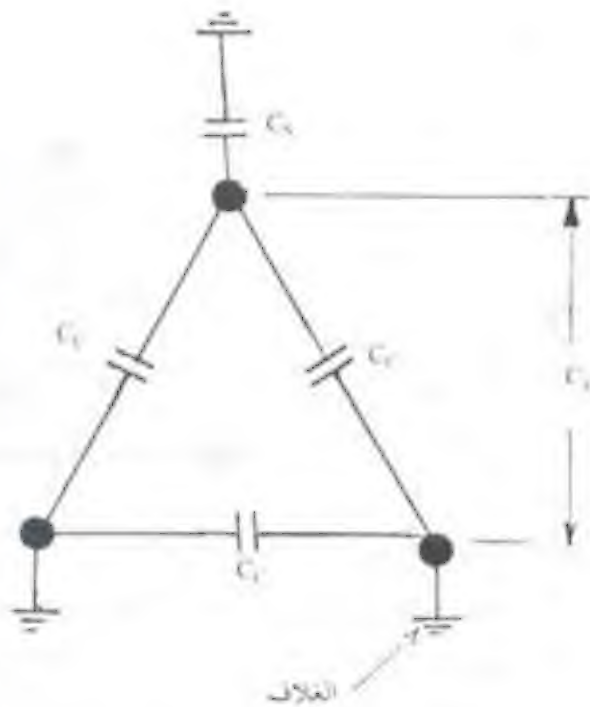
ب - نصل الثلاثة قلوب ببعضها ونقيس السعة بينهما وبين الغلاف، كما هو موضح بالشكل ١١-٥، نجد أن تلك السعة  $C_1$  هي :

$$C_1 = 3C_s \quad (50-5)$$

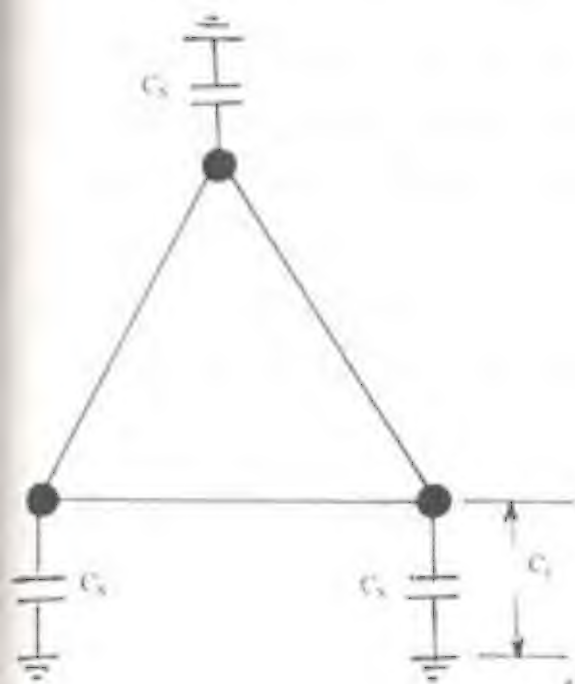
من المعادلتين (49-5) و (50-5) نجد أن :

$$C_s = \frac{1}{3} C_1 \quad (51-5)$$

$$C_c = \frac{1}{2} C_s - \frac{1}{6} C_1 \quad (52-5)$$



شكل ٥ - ١٠ تعيين قيمة  $C_x$



شكل ٥ - ١١ تعيين قيمة  $C_x$

$$C_0 = C_8 + 3C_6 = \frac{3}{2}C_8 - \frac{1}{6}C_7 \quad (53.5)$$

يمكن - علاوة على ما سبق - الحصول على قيمتي  $C_7$ ,  $C_8$  بتقريب مقبول من العلاقات الآتية:

$$C_8 = \frac{\epsilon}{18 \log_e (D/d)} \quad (\mu F/km) \quad (54.5)$$

حيث D تساوي قطر موصل واحد مضافاً إليه ما يأتي:

١ - سمك العازل بين موصلين.

٢ - سمك العازل بين أي موصل والغلاف.

$$C_7 = 1.8 C_8 \quad (54.5)$$

$$C_0 = 1.2 C_7 \quad (55.5)$$

## ٢. المعاوقات التساهمية

تساوي مفاعلة التتابع الموجب ومفاعلة التتابع السالب في الكابلات ثلاثة القلوب، ويمكن حسابهما من المعادلة

$$X_1 = X_2 = 2\pi f 10^{-4} \left( K + 0.2 \ln \frac{2S}{d} \right) (\text{Ohm/km}) \quad (56.5)$$

حيث:

S: المسافة بين مركزي موصلين في الكابل

d: قطر الموصل

K: ثابت يعتمد على تكوين الموصل ومبين في الجدول ٣-٥.

وتُحسب مفاعلة التتابع الصفري من المعادلة.

$$X_0 = 0.434 \log_{10} (D/GMD) \quad (\text{Ohm/km}) \quad (57.5)$$

حيث GMD هو متوسط القطر الهندسي للموصلات داخل الكابل ويمكن الحصول عليه من الهامش هـ.

تؤخذ قيمة GMD عادة ٠,٧٥ من قطر الدائرة المحيط بالموصلات

الثلاثة داخل الكابل على فرض أن الموصلات دائرية (في حالة عدم توفر المعلومات).

أما قيمة المقاومة للتتابع الصفري فهي مقاومة التيار المتردد مضافاً إليها:

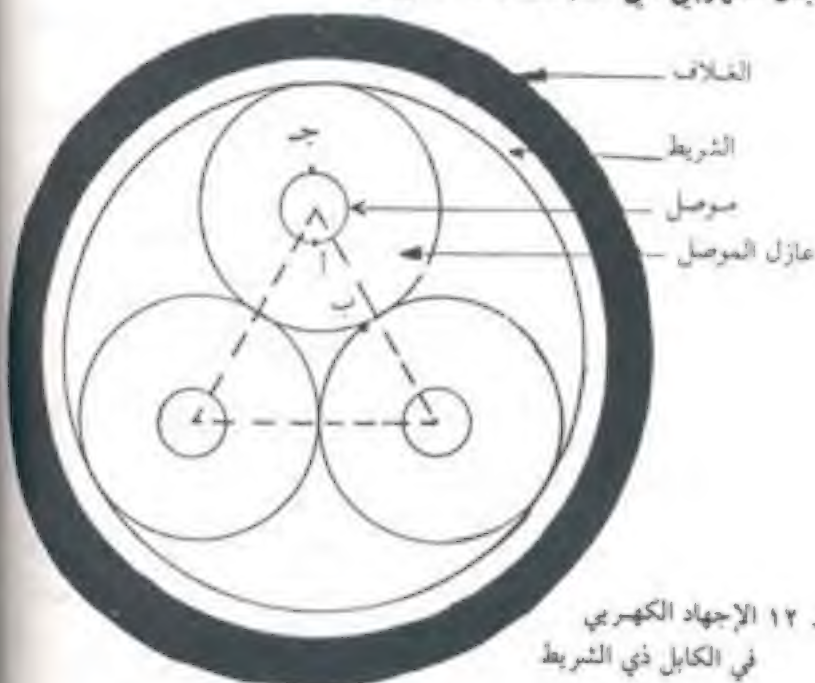
i - التأثير القشري

ii - ثلاثة أضعاف مقاومة الغلاف المعدني.

وعند وجود أكثر من طبقة معدنية تعتبر هذه الطبقات على التوازي عند حساب مقاومة الغلاف المعدني. ويمكن القول بصفة عامة أن جميع مسارات التيار الأرضي في جميع الأجسام المعدنية الموجودة بالكابل (ما عدا الموصل) تُعتبر على التوازي ثم توجد ثلاثة أمثالها لإيجاد المقاومة لكل طور وذلك بالنسبة للتتابع الصفري فقط.

يمكن حساب تلك المقاومات من أبعاد الكابل ومقاومية تلك المواد بعد تحديد اتجاه مسار التيار في كل منها.

٤ . المجال الكهربائي في الكابلات ذات الشريط



شكل ٥ - ١٢ الإجهاد الكهربائي في الكابل ذي الشريط

لا يمكن في الكابلات ثلاثية القلب ذات الشريط أن نحسب المجال الكهربائي بدقة حتى على فرض أن العازل متجانس . أمكن إيجاد خواص المجال الكهربائي معملياً ، ويمكن تلخيص النتائج فيما يأتي :

أ - المجال داخل الكابل له الطبيعة ثلاثية الأطوار . يدور المجال بسرعة زاوية منتظمة كما في حالة الآلات ثلاثية الأطوار .

ب - يعتمد شدة المجال الكهربائي على أبعاد الكابل وعلى جهد الكابل نفسه .

ج - تتشابه المجالات الكهربائية في الكابلات المتشابهة في التكوين والشكل الهندسي إلا أن مقاديرها تعتمد على القيم العددية للأبعاد والجهد .

د - يحدث أقصى قيمة للإجهاد الكهربائي في المنطقة المثلية المكونة من الخطوط الواصلة بين مراكز الموصلات الثلاثة الموضحة بخطوط متقطعة في الشكل ١٣-٥ . ولا تعتمد قيمة الإجهاد الكهربائي على سمك الشريط .

هـ - أقصى قيمة للإجهاد الكهربائي داخل الكابل تحدث على العازل عند اتصاله بالموصل داخل المنطقة المثلية (نقطة أ) .

و - يتغير اتجاه المجال الكهربائي بحيث يحدث في لحظات معينة أن توجد مركبة مماسة للمجال الكهربائي عند نقطة معينة مثل ب في الوقت الذي يكون المجال عمودياً عند أ مثلاً . وهذه المركبة المماسية هي المسؤولة فعلياً عن ضعف العازل وانتهيار خواصه الكهربائية . وكما ذكرنا من قبل فإن وجود الشارة في الكابلات من النوع H يعالج هذه الظاهرة .

ز - تعتمد قيمة الإجهاد الكهربائي عند نقطة مثل ج على السطح الفاصل بين الموصل والعازل من ناحية الغلاف اعتماداً كبيراً على سمك الشريط العازل بحيث أنه كلما زاد سمك العازل كلما قلت قيمة هذا الإجهاد .

يبين الشكل ١٣-٥ شكل المجال الكهربائي داخل الكابل عندما يكون الموصل العلوي عند أقصى قيمة للجهد المتردد .



## إختيار الكابل

يخضع اختيار الكابل المناسب لاعتبارات عديدة، منها ما يتصل بالوفاء بمتطلبات محددة كملائمة الكابل لظروف البيئة المحيطة به، ومنها ما يتصل بعملية أداء وتشغيل الكابل نفسه كقدرة الكابل على حمل التيار وكذلك قدرته على تحمل تيارات القصر. ندرس فيما يلي أهم العوامل التي يتحدد تبعاً لها اختيار الكابل.

### أولاً: تكوين الكابل ونوعه

يتم اختيار نوع الكابل من بين مجموعة كبيرة من الاختيارات، حيث يمكن استخدام كابل ذي ثلاثة قلوب أو أربعة قلوب، كما يمكن استخدام كابلات ذات قلب واحد في الدوائر ثلاثية الأطوار. يجب مراعاة مواد وتركيب الكابل من حيث نوع العازل والموصل والغلاف والتسليح والحماية الخارجية وملائمة ذلك كله لظروف البيئة والتشغيل. هذا بالإضافة إلى أية اشتراطات خاصة إضافية كمقاومة الزيوت والحرارة واللهب والمواد الكيماوية.

إن اختيار الكابل يخضع للمفاضلة بين تلك العوامل كلها مجتمعة مع الأخذ في الاعتبار العامل الاقتصادي وتوافر الخبرة اللازمة للتعامل مع الكابل. نقدم فيما يلي تفصيلاً لذلك في الاستخدامات المختلفة للكابلات.

#### ١. كابلات شبكة الامداد العامة Cables for public supply :

تعمل شبكة الإمداد العامة على جهود تتراوح بين ١١ ك ف و ٣٣ ك ف. كما يُستعمل جهد ٦٦ ك ف أحياناً في تلك الشبكات.

تستعمل كابلات العازل الورقي وكابلات XLPE و EPR عادة على جهدي ٢٢ ك ف و ٣٣ ك ف. وتخضع عملية الاختيار للعامل الاقتصادي في أغلب الأحيان. إلا أنه يجب التنويه إلى أن عمليات لحام وتوصيل نهايات كابل العوازل الورقية تحتاج إلى مهارة وخبرة ودقة في الأداء أعلى من تلك المطلوبة في كابلات XLPE وكابلات EPR. لذلك فإن كثيراً من الدول التي تندر عندها الخبرة باستعمال الكابلات الورقية تفضل استعمال كابلات العوازل البوليمرية بسبب البساطة النسبية في التعامل معها كما أن تأثيرها بالرطوبة أقل. هذا بالإضافة إلى أن كابلات العوازل البوليمرية تتحمل درجات حرارة أعلى من كابلات العوازل الورقية مما يجعلها أنسب استعمالاً في البلدان الحارة.

يجب عند استخدام الكابلات ذات العوازل الورقية في شبكة الامداد العامة أن تكون من النوع ذي الستارة ومزودة بغلاف رصاصي وتسليح خارجي. أما عند استخدام كابلات XLPE فلا توجد ضرورة كبيرة لتسليح الكابل إلا عند توقع تعرضه لإجهادات ميكانيكية عنيفة. ويُزود الكابل عادة بستارة من أسلاك النحاس كمادة تأريض Earthing محيطة به.

يستعمل كلاً من كابلات العازل الورقي وكابلات XLPE على جهدي ١١ ك ف و ١٥ ك ف، إلا أنه أصبح من المتفق عليه عالمياً استخدام كابلات XLPE في شبكات التوزيع الأولية حيث يستخدم كابلات ثلاثية الأطوار عادة.

## ii . كابلات المنشآت الصناعية العامة

تستعمل كابلات PVC للمنشآت الصناعية حتى جهد ٣,٣ ك ف بنجاح تام. تستخدم بعض المنشآت الصناعية كابلات PVC على جهد ١١ ك ف وأكبر من ذلك حتى ١٥ ك ف عادة. إلا أن الاتجاه السائد حتى الآن هو عدم استخدام كابلات PVC لجهد أعلى من ٣,٣ ك ف نظراً لارتفاع قيمة السماحية ومعامل القدرة له. تُستخدم كابلات العازل الورقي وكذلك كابلات XLPE لجهد ١١ ك ف وأعلى من ذلك وكذلك يستخدم عازل EPR في بعض الأحيان.



### iii . كابلات المصانع الكيماوية وصناعات البتروكيماويات

نظراً لتعرض تلك الكابلات للمواد الكيماوية كالزيوت والأحماض والغازات والمواد العضوية فإنه يجب عمل الحماية اللازمة للكابل . يتم ذلك إما باستعمال كابلات ذات غلاف أو كابلات عليها طبقة الحماية الخارجية المناسبة أو الطريقتين معاً . تجدر الإشارة هنا إلى أن بعض المواد العضوية لها القدرة على اختراق طبقة الحماية الخارجية للكابل والوصول إلى قلب الكابل مما يزيد من احتمال حدوث الحريق . كما يراعى منع احتمال تسرب الزيوت والمواد الأخرى القابلة للاشتعال ووصولها إلى الكابل .

### iv . كابلات السفن

تُستعمل كابلات ذات موصلات نحاسية، ولا تُستعمل موصلات الألومنيوم نظراً لتعرضها للتآكل السريع على السفن . يُستعمل الآن عازل EPR بدلاً من مطاط البتيل نظراً لخواصه الفيزيائية الأفضل وتحمله لدرجات حرارة أعلى . لا يُفضل استخدام كابلات PVC لعدم قدرتها على تحمل درجات حرارة أعلى من ٦٠°م على السفينة كما لا يفضل استخدام عوازل XLPE نظراً لقساوة تلك المادة مما يصعب عملية ثني وتداول الكابل في مسارات السفن الضيقة . تُستعمل المواد المقاومة للحرارة والزيوت والمبطئة للهب (HOFR) كغلاف أو كحماية خارجية لكابلات السفن مثل مادة PCP ومادة CSP .

### ثانياً: قدرة حمل التيار Current carrying capacity

يسبب مرور التيار في موصل الكابل وكذلك وجود فرق جهد بين الموصل والأرض مجموعة من المفقودات تعمل على رفع درجة حرارة الموصل والعازل وباقي مكونات الكابل . تتحدد قدرة حمل التيار لكابل معين بأقصى درجة حرارة يمكن أن يتحملها الكابل بصفة مستمرة . عند تلك الدرجة يحدث اتزان حراري حيث يتساوى معدل توليد الطاقة المفقودة مع معدل تسرب هذه الطاقة من

الكابل عن طريق اتصاله بالوسط الخارجي المحيط به . يتأثر مقدار الارتفاع في درجة حرارة موصل الكابل - وبالتالي درجة الاتزان الحراري - بالعوامل الآتية :

١ - تيار الموصل  $I$

٢ - مقاومة الموصل  $R$

٣ - الفقد في العازل  $W_d$  : وهو يساوي  $(\omega C U_0^2 \tan \delta)$  وات / متر

٤ - المقاومة الحرارية بين الموصل والغلاف  $T_1$  : تعرف المقاومة الحرارية

Thermal resistivity بأنها الفرق في درجة الحرارة بالكلفن ، بين سطحين

متوازيين من متر مكعب من المادة عندما يمر بينهما قدرة مقدارها وات

واحد من الحرارة ووحدتها هي كلفن متر لكل وات  $(Km/W)$  .

٥ - المقاومة الحرارية للبطانة بين الغلاف والتسليح  $T_2$   $(Km/W)$

٦ - المقاومة الحرارية للغلاف الخارجي  $T_3$   $(Km/W)$

٧ - المقاومة الحرارية بين سطح الكابل والوسط المحيط به  $T_4$   $(Km/W)$  .

٨ - عدد الموصلات الحاملة للتيار في الكابل  $n$

٩ - النسبة بين الفقد في الغلاف المعدني والفقد في موصل الكابل  $\lambda_1$

١٠ - النسبة بين الفقد في التسليح والفقد في موصل الكابل  $\lambda_2$  .

تعطى المعادلة الآتية مقدار الارتفاع في درجة حرارة الموصل  $\Delta\theta$

بالكلفن :

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2 R (1 + \lambda_1) + W_d] n T_2$$

$$+ [I^2 R (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4) \quad (1-6)$$

يعطي الجدول ٦-١ قيم المقاومة الحرارية للمواد المستعملة في صناعة

الكابلات وذلك تبعاً للمواصفة (IEC-287) . ويعطي الجدول ٦-٢ القيم النمطية

للمقاومة الحرارية للأنواع المختلفة من التربة .

جدول ٦-١ المقاومة الحرارية للمواد

المادة	المقاومة الحرارية (Km/W)
العوازل	
الورق	٥,٥ - ٦,٥
PE و XLPE	٣,٥
PVC حتى جهد ٣ ك ف	٥,٠
أعلى من ٣ ك ف	٦,٠
EPR حتى ٣ ك ف	٣,٥
أعلى من ٣ ك ف	٥,٠
مطاط البتيل والمطاط الطبيعي	٥,٠
الحماية الخارجية	
الجوت والمواد اللبيفية	٦,٠٠
PCP	٥,٥
PVC حتى جهد ٣٥ ك ف	٥,٠٠
أعلى من ٣٥ ك ف	٦,٠٠
PE	٣,٥
مواد المجاري ducts	
الأسمنت المسلح	١
القبر	٤,٨
PVC	٧,٠



## جدول ٦-٢ المقاومة الحرارية للتربة

المقاومة الحرارية (Km/W)	حالة التربة	حالة الطقس
٠,٧	رطوبة جداً	رطب دائماً
١,٠	رطوبة	أمطار منتظمة
٢,٠	جافة	أمطار نادرة
٣,٠	جافة جداً	لا توجد أمطار عادة

إن حساب قيمة الارتفاع في درجة حرارة الموصل عملية شاقة ولا يتم اللجوء إليها عادة إلا في مصانع الكابلات نفسها.

تعطى مصانع الكابلات عادة جداول بها قدرة حمل التيار للكابلات المختلفة عند ظروف تشغيل قياسية. ونظراً لاختلاف ظروف التشغيل الواقعية عن الظروف القياسية فإن هذه الجداول تُزوّد بملاحق خاصة لتصحيح قيمة قدرة حمل التيار تبعاً لكل ظرف عن طريق ضرب تلك القيمة المناظرة للحالة القياسية في معامل التقنين Rating factor المناظر للحالة الواقعية. رغم أن لكل مصنع كابلات جداوله وملاحقه الخاصة به إلا أننا نعطي فيما يلي صوراً نمطية لتلك الجداول والملاحق يمكن بواسطتها الحصول على قدرة حمل التيار بصورة طيبة ودقيقة إلى حد ما وذلك في حالة عدم توافر الجداول الخاصة بالكابل المعني.

### ١ - الكابلات الموضوعة في الهواء:

الظروف القياسية هي كما يأتي:

أ - درجة حرارة الهواء المحيط ٢٥°م لكابلات التوزيع والنقل و ٣٠°م للكابلات داخل المباني و ٣٥°م للكابلات على السفن.

ب - أقل مسافة بين الكابل والحائط هي ٢٠مم



- ح - المسافة بين الكابل وأقرب كابل آخر مجاور له لا تقل عن ١٥ سم،  
ويتم التبديل في مواضع الكابلات لمنع فقد التبادل الحراري .  
د - الكابل معزول عن ضوء الشمس المباشر .

يعطى الجدول ٣-٦ معاملات التقنين للتصحيح من ٢٥°م إلى درجات الحرارة الأخرى وذلك لأنواع الكابلات المختلفة .

جدول ٣-٦ معاملات التقنين لدرجة حرارة الوسط

عازل الكابل	أقصى درجة حرارة تشغيل للموصل م	٢٥	٣٠	٣٥	٤٠	٤٥	٥٠	٥٥
ورق	٦٥	١	٠,٩٣	٠,٨٥	٠,٧٧	٠,٦٨	٠,٥٨	٠,٤٧
ورق	٧٠	١	٠,٩٣	٠,٨٧	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٤	٠,٥٥
ورق	٨٠	١	٠,٩٤	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧٢	٠,٦٥
PVC	٧٠	١	٠,٩٣	٠,٨٧	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٤	٠,٥٥
XLPE	٩٠	١	٠,٩٥	٠,٩١	٠,٨٦	٠,٨٠	٠,٧٥	٠,٦٩

## ii - الكابلات المدفونة مباشرة في الأرض:

الظروف القياسية كما يأتي :

- أ - درجة حرارة الأرض ١٥°م  
ب - المقاومة الحرارية للتربة ١,٢ كلفن . متر/وات  
ح - الكابل المجاور ١,٨ م على الأقل  
د - عمق الدفن ٠,٥ متر لكابلات ١ ك ف  
٠,٨ متر لأعلى من ١ ك ف

تعطى الجداول من ٤-٦ إلى ٨-٦ معاملات التقنين لكل من درجة حرارة الأرض والمقاومية الحرارية للتربة وتجميع الكابلات وعمق الدفن .

جدول ٤-٦ معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض

عازل الكابل	أقصى درجة حرارة تشغيل للموصل °م	درجة حرارة الأرض °م						
		١٠	١٥	٢٠	٢٥	٣٠	٣٥	٤٠
ورق	٦٥	١,٠٥	١,٠	٠,٩٥	٠,٨٩	٠,٨٤	٠,٧٧	٠,٧١
ورق	٧٠	١,٠٤	١,٠	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠	٠,٧٤
ورق	٧٥	١,٠٤	١,٠	٠,٩٦	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٨٣	٠,٧٨
PVC	٧٠	١,٠٤	١,٠	٠,٩٥	٠,٩٠	٠,٨٥	٠,٨٠	٠,٧٤
XLPE	٩٠	١,٠٣	١,٠	٠,٩٧	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٨١

جدول ٥-٦ معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة

حجم الموصل (مم <sup>2</sup> )	المقاومية الحرارية للتربة (Km/W)						
	٠,٨	٠,٩	١,٠	١,٥	٢,٠	٢,٥	٣,٠
كابل ذو قلب واحد حتى ١٥٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩١	٠,٨١	٠,٧٣	٠,٦٧
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٧	١,١٢	١,٠٧	٠,٩٠	٠,٨٠	٠,٧٢	٠,٦٦
من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠	١,١٨	١,١٣	١,٠٨	٠,٩٠	٠,٧٩	٠,٧١	٠,٦٥
كابل عديد القلوب حتى ١٦	١,٠٩	١,٠٦	١,٠٤	٠,٩٥	٠,٨٦	٠,٧٩	٠,٧٤
من ٢٥ إلى ١٥٠	١,١٤	١,١٠	١,٠٧	٠,٩٣	٠,٨٤	٠,٧٦	٠,٧٠
من ١٨٥ إلى ٤٠٠	١,١٦	١,١١	١,٠٧	٠,٩٢	٠,٨٢	٠,٧٤	٠,٦٨

جدول ٦-٦ معاملات التقنين التجميعية لثلاثة كابلات أحادية القلب متجاوزة

المسافة بين مركزي كابلين متجاورين

ك ف	جهد الكابل	عدد الكابلات المتجاوزة	تلامس		٠,١٥ م	٠,٣ م	٠,٤٥ م	٠,٦ م
			مثلي	مسطح				
		٢	٠,٧٧	٠,٨٠	٠,٨٢	٠,٨٨	٠,٩٠	٠,٩٣
		٣	٠,٦٥	٠,٦٨	٠,٧٢	٠,٧٩	٠,٨٣	٠,٨٧
	١/٠,٦	٤	٠,٥٩	٠,٦٣	٠,٦٧	٠,٧٥	٠,٨١	٠,٨٥
		٥	٠,٥٥	٠,٥٨	٠,٦٣	٠,٧٢	٠,٧٨	٠,٨٣
		٦	٠,٦٢	٠,٥٦	٠,٦٠	٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٢
	أعلى	٢	٠,٧٨	٠,٨٠	٠,٨١	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
	من	٣	٠,٦٦	٠,٦٩	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠	٠,٨٣
	٣,٣/١,٩	٤	٠,٦٠	٠,٦٣	٠,٦٥	٠,٧٢	٠,٧٦	٠,٨٠
	حتى	٥	٠,٥٥	٠,٥٨	٠,٦١	٠,٦٨	٠,٧٣	٠,٧٧
	٢٢/١٢,٧	٦	٠,٥٢	٠,٥٥	٠,٥٨	٠,٦٦	٠,٧٢	٠,٧٦
	٣٣/١٩	٢	٠,٧٩	٠,٨١	٠,٨١	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
		٣	٠,٦٧	٠,٧٠	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠	٠,٨٣
		٤	٠,٦٢	٠,٦٥	٠,٦٥	٠,٧٢	٠,٧٦	٠,٨٠
		٥	٠,٥٧	٠,٦٠	٠,٦٠	٠,٦٨	٠,٧٣	٠,٧٧
		٦	٠,٥٤	٠,٥٧	٠,٥٧	٠,٦٦	٠,٧٢	٠,٧٦

جدول ٧-٦ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد الكابلات في المجموعة	تلامس	المسافة بين مراكز الكابلات			٠,٦ م
			٠,١٥ م	٠,٣ م	٠,٤٥ م	
١/٠,٦	٢	٠,٨١	٠,٨٧	٠,٩١	٠,٩٣	٠,٩٤
	٣	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٤	٠,٨٧	٠,٩٠
	٤	٠,٦٣	٠,٧٤	٠,٨١	٠,٨٦	٠,٨٩
	٥	٠,٥٩	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٣	٠,٨٧
	٦	٠,٥٥	٠,٦٧	٠,٧٦	٠,٨٢	٠,٨٦
أعلى من ٣,٣/١,٩ حتى ٢٢/١٢,٧	٢	٠,٨٠	٠,٨٥	٠,٨٩	٠,٩٠	٠,٩٢
	٣	٠,٦٩	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٤	٠,٨٦
	٤	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٠	٠,٨٤
	٥	٠,٥٧	٠,٦٦	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨١
	٦	٠,٥٥	٠,٦٣	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠
٣٣/١٩	٢	٠,٨٠	٠,٨٣	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩١
	٣	٠,٧٠	٠,٧٣	٠,٧٨	٠,٨٢	٠,٨٥
	٤	٠,٦٤	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨	٠,٨٢
	٥	٠,٥٩	٠,٦٣	٠,٧٠	٠,٧٥	٠,٧٩
	٦	٠,٥٦	٠,٦٠	٠,٦٨	٠,٧٤	٠,٧٨



جدول ٨-٦ معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز الكابل أو مركز المجموعة الثلاثية)

٣,٣/١,٩ ك ف حتى ٣٣/١٩ ك ف		١/٠,٦ ك ف		عمق الدفن (متر)	
أعلى من ٣٠٠ مم <sup>٢</sup>	حتى ٣٠٠ مم <sup>٢</sup>	أعلى من ٣٠٠ مم <sup>٢</sup>	من ٧٠ إلى ٣٠٠ مم <sup>٢</sup>	حتى ٥٠ مم <sup>٢</sup>	
—	—	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠	٠,٥٠
—	—	٠,٩٧	٠,٩٨	٠,٩٩	٠,٦٠
١,٠٠	١,٠٠	٠,٩٤	٠,٩٦	٠,٩٧	٠,٨٠
٠,٩٧	٠,٩٨	٠,٩٢	٠,٩٤	٠,٩٥	١,٠٠
٠,٩٥	٠,٩٦	٠,٩٠	٠,٩٢	٠,٩٤	١,٢٥
٠,٩٤	٠,٩٥	٠,٨٩	٠,٩١	٠,٩٣	١,٥٠
٠,٩٢	٠,٩٤	٠,٨٧	٠,٨٩	٠,٩٢	١,٧٥
٠,٩٠	٠,٩٢	٠,٨٦	٠,٨٨	٠,٩١	٢,٠٠
٠,٨٩	٠,٩١	٠,٨٥	٠,٨٧	٠,٩٠	٢,٥
٠,٨٨	٠,٩٠	٠,٨٣	٠,٨٦	٠,٨٩	٣ أو أكثر

iii . الكابلات الموضوعة داخل مجاري:

الظروف القياسية هي كما يأتي :

- درجة حرارة الأرض ١٥°م
  - المقاومة الحرارية للتربة والمجاري ١,٢ كلفن متر/وات
  - الكابل المجاور ١,٨ متر على الأقل
  - عمق الدفن ٠,٥ متر لكابلات ١ ك ف
- ٠,٨ متر للكابلات ذات العازل الورقي وللجهود أعلى من ١ ك ف

معاملات التقنين لدرجة حرارة الأرض هي نفسها كما في حالة الدفن المباشر المعطاة بالجدول ٤-٦ . بقية معاملات التقنين معطاة في الجداول من ٩-٦ إلى ١٢-٦ .

جدول ٩-٦ معاملات التقنين للمقاومية الحرارية للتربة

المقاومية الحرارية للتربة (Km/W)							حجم الموصل (مم <sup>2</sup> )
٣,٠	٢,٥	٢	١,٥	١	٠,٩	٠,٨	
							كابل ذو قلب واحد
٠,٧٥	٠,٨١	٠,٨٧	٠,٩٤	١,٠٤	١,٠٧	١,١	حتى ١٥٠
٠,٧٣	٠,٧٩	٠,٨٦	٠,٩٤	١,٠٥	١,٠٨	١,١١	من ١٨٥ إلى ٤٠٠
٠,٧٠	٠,٧٧	٠,٨٤	٠,٩٣	١,٠٦	١,٠٩	١,١٣	من ٥٠٠ إلى ١٢٠٠
							كابل عديد القلوب
٠,٨٣	٠,٨٧	٠,٩٢	٠,٩٧	١,٠٣	١,٠٤	١,٠٥	حتى ١٦
٠,٧٨	٠,٨٥	٠,٩٠	٠,٩٦	١,٠٣	١,٠٥	١,٠٧	من ٢٥ إلى ١٥٠
٠,٧٦	٠,٨٢	٠,٨٧	٠,٩٥	١,٠٤	١,٠٦	١,٠٩	من ١٨٥ إلى ٤٠٠



جدول ٦-١٠ معاملات التقنين التجميعية لكابلات أحادية القلب مثلثة الوضع،  
في مجاري في وضع مسطح

جهد الكابل ك ف	عدد الدوائر المتجاورة	المسافة بين مراكز المجاري تلامس	٠,٤٥ م	٠,٦ م
١/٠,٦	٢	٠,٨٦	٠,٩٠	٠,٩٣
	٣	٠,٧٧	٠,٨٣	٠,٨٧
	٤	٠,٧٣	٠,٨١	٠,٨٥
	٥	٠,٧٠	٠,٧٨	٠,٨٣
	٦	٠,٦٨	٠,٧٧	٠,٨٢
من ١,٩/٣,٣ حتى ١٢,٧/٢٢	٢	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
	٣	٠,٧٥	٠,٨٠	٠,٨٣
	٤	٠,٧٠	٠,٧٦	٠,٨٠
	٥	٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٧٧
	٦	٠,٦٤	٠,٧١	٠,٧٦
٣٣/١٩	٢	٠,٨٥	٠,٨٨	٠,٩٠
	٣	٠,٧٦	٠,٨٠	٠,٨٣
	٤	٠,٧١	٠,٧٦	٠,٨٠
	٥	٠,٦٧	٠,٧٣	٠,٧٧
	٦	٠,٦٥	٠,٧١	٠,٧٦

جدول ١١-٦ معاملات التقنين التجميعية للكابلات عديدة القلوب داخل مجاري في وضع مسطح

المسافة بين مركز المجاري				عدد المجاري في المجموعة	جهد الكابل ك ف
٠,٦٠ م	٠,٤٥ م	٠,٣٠ م	تلامس		
٠,٩٦	٠,٩٥	٠,٩٣	٠,٩٠	٢	١/٠,٦
٠,٩٣	٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٢	٣	
٠,٩١	٠,٨٩	٠,٨٥	٠,٧٨	٤	
٠,٩٠	٠,٨٧	٠,٨٢	٠,٧٥	٥	
٠,٩٠	٠,٨٦	٠,٨١	٠,٧٢	٦	
٠,٩٤	٠,٩٣	٠,٩١	٠,٨٨	٢	٣,٣/١,٩ حتى ٢٢/١٢,٧
٠,٨٩	٠,٨٧	٠,٨٤	٠,٨٠	٣	
٠,٨٧	٠,٨٤	٠,٨١	٠,٧٥	٤	
٠,٨٥	٠,٨٢	٠,٧٧	٠,٧١	٥	
٠,٨٤	٠,٨٠	٠,٧٥	٠,٦٩	٦	
٠,٩٣	٠,٩٢	٠,٨٩	٠,٨٧	٢	٣٣/١٩
٠,٨٧	٠,٨٥	٠,٨٢	٠,٧٨	٣	
٠,٨٥	٠,٨٢	٠,٧٨	٠,٧٣	٤	
٠,٨٣	٠,٧٩	٠,٧٥	٠,٦٩	٥	
٠,٨٢	٠,٧٨	٠,٧٣	٠,٦٧	٦	

جدول ١٢-٦ معاملات تقنين عمق الدفن (حتى مركز المجري أو المجموعة  
المثلثية للمجاري)

عمق الدفن (متر)	١/٠,٦ ك ف	من ٣,٣/١,٩ حتى ٣٣/١٩ ك ف	عديد القلوب	قلب واحد	عديد القلوب
٠,٥٠	١,٠٠	١,٠٠	—	—	—
٠,٦٠	٠,٩٨	٠,٩٩	—	—	—
٠,٨٠	٠,٩٥	٠,٩٧	١,٠٠	١,٠٠	١,٠٠
١,٠٠	٠,٩٣	٠,٩٦	٠,٩٩	٠,٩٨	٠,٩٩
١,٢٥	٠,٩٠	٠,٩٥	٠,٩٧	٠,٩٥	٠,٩٧
١,٥٠	٠,٨٩	٠,٩٤	٠,٩٦	٠,٩٣	٠,٩٦
١,٧٥	٠,٨٨	٠,٩٤	٠,٩٥	٠,٩٢	٠,٩٥
٢,٠٠	٠,٨٧	٠,٩٣	٠,٩٤	٠,٩٠	٠,٩٤
٢,٥٠	٠,٨٦	٠,٩٣	٠,٩٣	٠,٨٩	٠,٩٣
٣,٠٠ أو أكثر	٠,٨٥	٠,٩٢	٠,٩٢	٠,٨٨	٠,٩٢

لكي نتصور مدى تأثير معاملات التقنين المختلفة على عملية اختيار حجم الكابل نعتبر حالة منشأة صناعية إحتاجت إلى كابلات PVC بمقنن جهد ١٠٠٠/٦٠٠ فولت وذلك لحمل تيار مقداره ١٠٠٠ أمبير لكل طور. إقتضت ظروف التشغيل استعمال ٤ كابلات ذات قلب واحد بحيث يحمل كل كابل ٢٥٠ أمبير وذلك للطور الواحد. كما أن مسار الكابل كان مدفوناً مباشرة في الأرض على أن توضع الكابلات كلها في وضع أفقي مسطح على عمق ١,٢٥ متر من سطح الأرض والمسافة بين كل كابل والذي يجاوره ٣٠ سم. المقاومة الحرارية للتربة ٢ كلفن متر/وات ودرجة حرارتها ٤٠ م°.

معاملات التقنين هي كما يأتي :

معامل تقنين درجة حرارة الأرض = ٠,٧٤ (من جدول ٣-٦)

معامل تقنين المقاومة الحرارية للتربة = ٠,٨ (من جدول ٦-٤ على أساس أن المقطع سوف يتجاوز ١٥٠ مم<sup>٢</sup>).

معامل تقنين عمق الدفن = ٠,٩ (من جدول ٦-٧)

معامل التقنين التجميعي = ٠,٧٥ (من جدول ٦-٥)

بضرب معاملات التقنين الأربعة في بعضها نحصل على معامل التقنين

الكلي للكابل وهو يساوي  $٠,٧٤ \times ٠,٨ \times ٠,٩ \times ٠,٧٥ = ٠,٤$

معنى ذلك أنه يلزم إيجاد كابل ذي مقطع يتحمل تياراً مقداره

$(٢٥٠ \div ٠,٤) = ٦٢٥$  أمبير تحت ظروف التشغيل العادية وهو ما يكافئ تياراً مقداره ٢٥٠ أمبير في الظروف القياسية.

### ثالثاً: تيار القصر Short circuit current

يحدث في كثير من الأحيان أن يكون العامل المحدد لاختيار مساحة مقطع الموصل هو قدرة الكابل على حمل تيارات القصر وليست قدرته على حمل التيار في الظروف العادية للتحميل. ينشأ عن تيارات القصر التي يصل مقدارها إلى أكثر من عشرين مرة من تيار الحمل العادي إجهادات ميكانيكية وحرارية تحدد مقدار الفترة الزمنية التي يمكن للكابل أن يتحملها بوجود تيار القصر. إن عازل الكابل هو أكثر المواد تأثراً بتلك الإجهادات، حيث تصل أقصى درجة حرارة مسموح بها إلى ٢٥٠°م في الورق و ١٥٠°م في PVC و ٢٥٠°م في XLPE.

تتغير أقصى فترة زمنية مسموح بها لتيار القصر داخل الكابل تغيراً عكسياً مع تيار القصر تبعاً للعلاقة.

$$I^2 = \frac{K^2 S^2}{T} \log_e \frac{\theta_1 + \beta}{\theta_0 + \beta} \quad (2-6)$$

حيث

I: تيار القصر المتمائل (r.m.s) بالأمبير

T: فترة القصر بالثانية



S: مساحة الموصل (مم<sup>2</sup>)  
 $\theta_1$ : درجة الحرارة النهائية (م°)  
 $\theta_0$ : درجة الحرارة قبل القصر مباشرة (م°)  
 $K, \beta$ : ثابتان يعتمدان على مادة المعادن الموجودة داخل الكابل، ويتعينان من الجدول ٦-١٣.

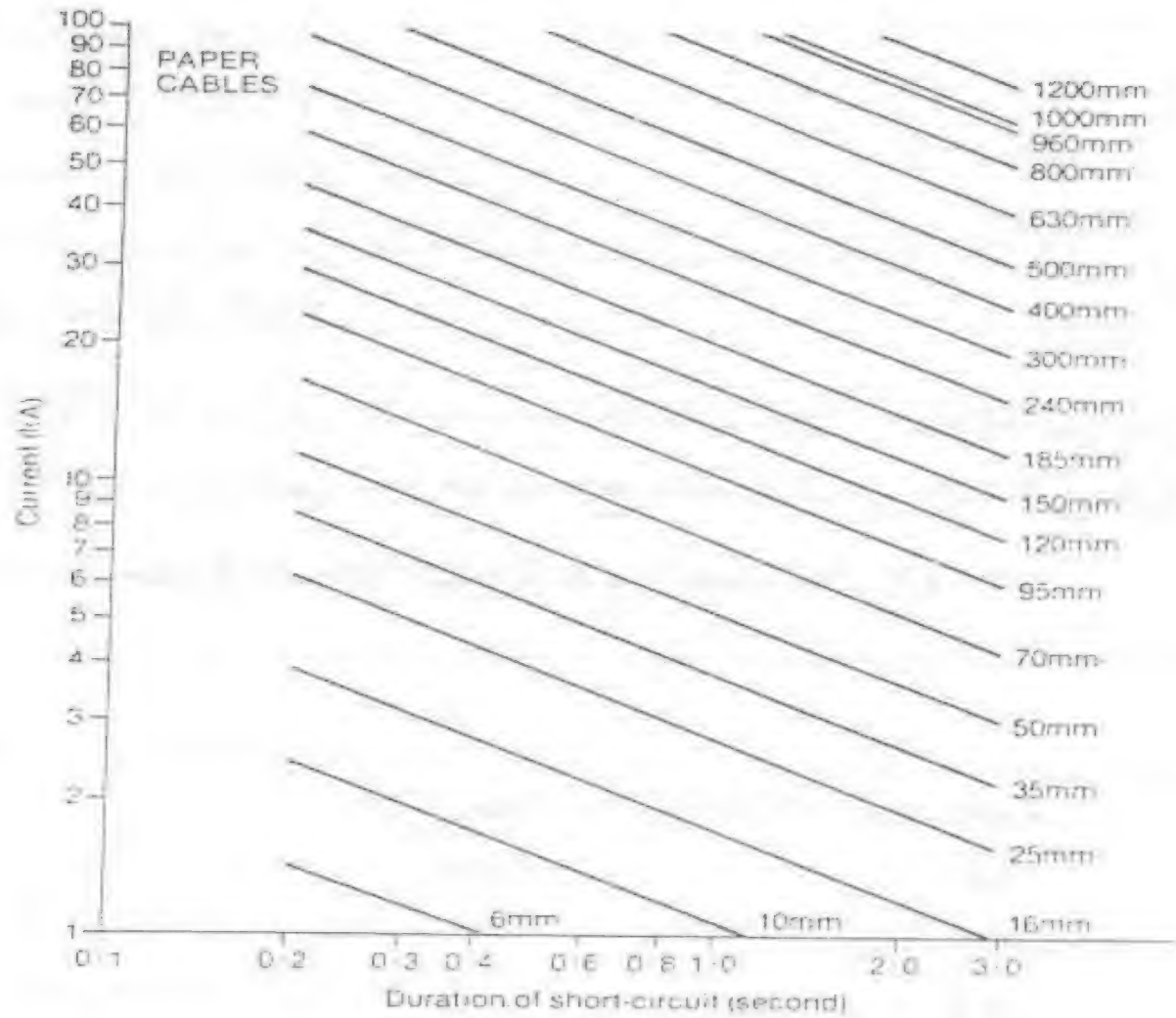
تجدر الإشارة هنا إلى أن مصانع الكابلات تعطي العلاقة بين تيار القصر وفترته على شكل رسم بياني كما هو موضح بالأشكال من ٦-١ إلى ٦-٦.

جدول ٦-١٣ قيم  $\beta$  و  $K$  في المعادلة (٦-٢)

المادة	$\beta$	$K$
نحاس	٢٣٤,٥	٢٢٦
ألومنيوم	٢٢٨	١٤٨
رصاص	٢٣٠	٣٢
صلب	٢٠٢	٧٨

نود أن نذكر هنا إلى أن الإجهادات الميكانيكية الناشئة من تيار القصر قد تقلل من الفترة الزمنية التي يتحملها الكابل في وجود القصر، حيث يمكن أن تؤدي إلى انفجار الكابل في حالة الكابلات عديدة القلوب. يجب لذلك الاهتمام بهذه الظاهرة وخصوصاً في كابلات العوازل الورقية والكابلات البوليمرية غير المسلحة. إن استخدام الكابلات وحيدة القلب هو أفضل من هذه الناحية حيث لا تتولد قوى تنافر شديدة بين الموصلات وبعضها أثناء القصر كما يحدث في حالة الكابلات عديدة القلوب.

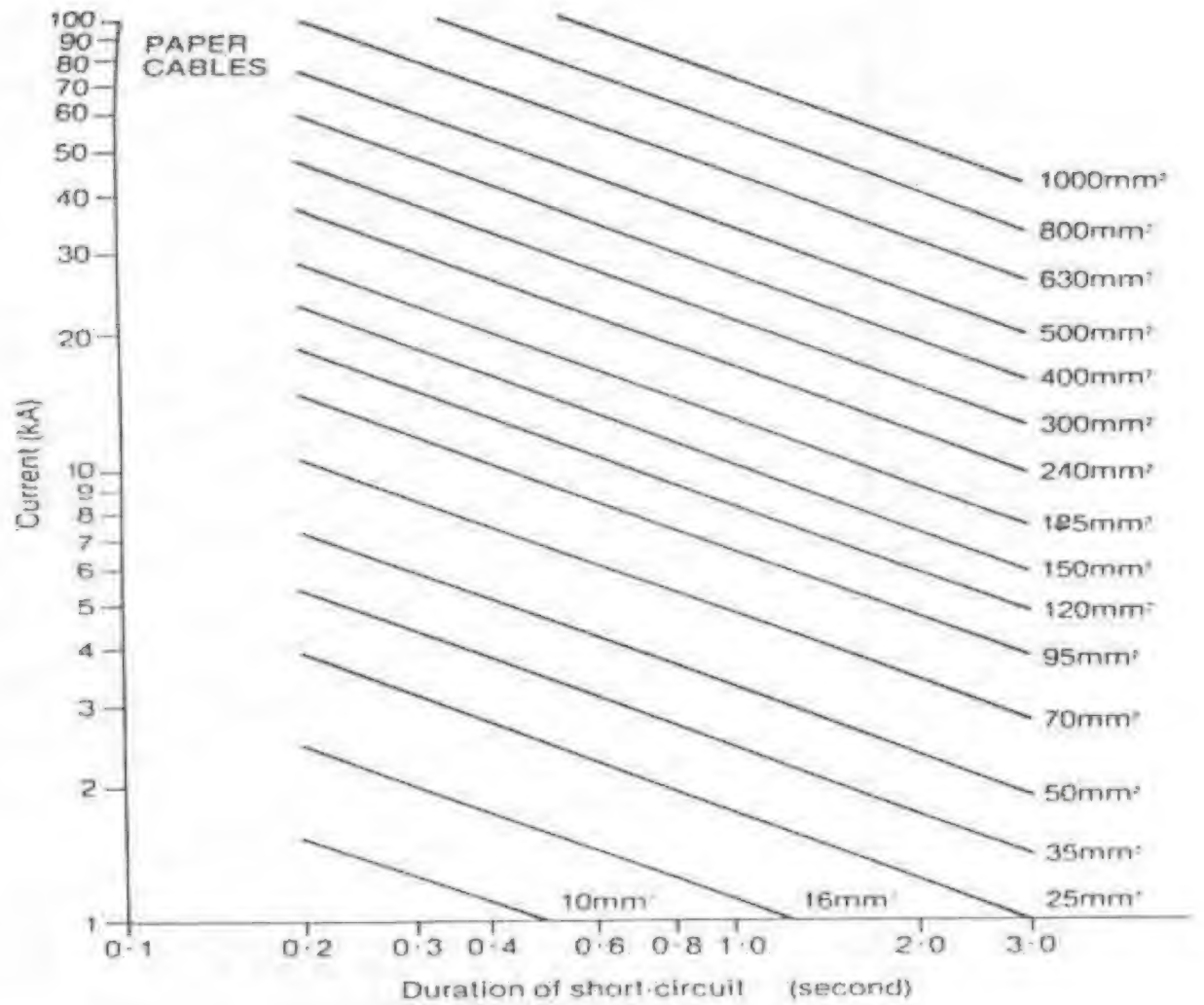
إضافة إلى ما سبق، فإن القصر غير المتماثل كالقصر بين أحد الخطوط والأرض يؤدي إلى تيار قصر غير متماثل مما يزيد من تيارات الغلاف والتسليح والتي تتأثر بشدة بهذه التيارات. نوصي بأخذ ذلك في الاعتبار والاسترشاد بالجدول من ٦-١٤ إلى ٦-١٩ في حالة الحاجة إليها وذلك لفترة قصر ثانية واحدة.



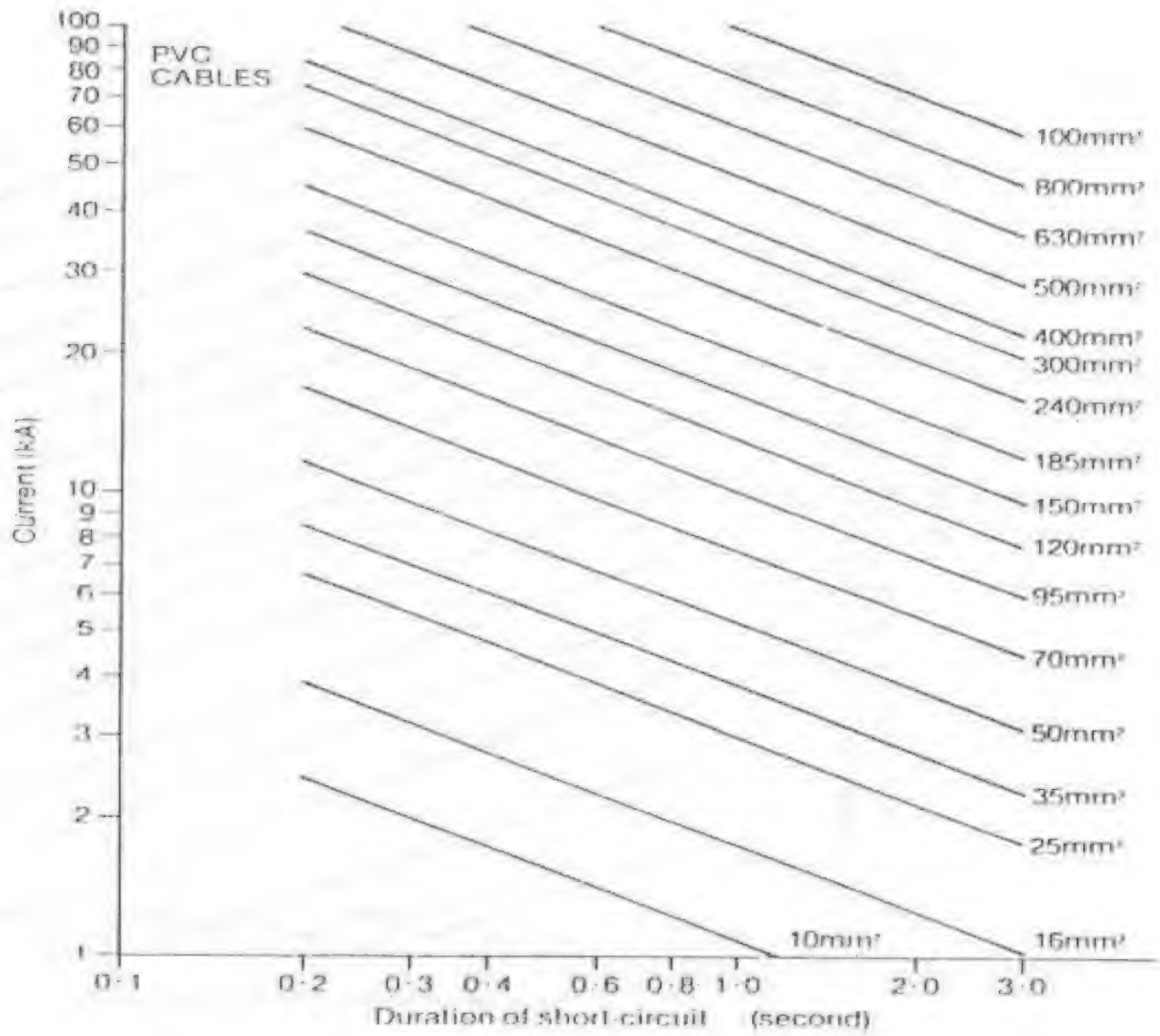
شكل ٦ - ١ مقننات تيار القصر للكابلات المعزولة بالورق وموصلات نحاسية. تطبق هذه المقننات حتى جهد ٦,٦/٣,٨ ك ف. ترفع هذه المقننات بالنسب الآتية للجهود الأعلى

النسب	الجهد ك ف	نوع الكابل
١,٦	١١/٦,٣٥	٣ قلوب (شريط)
١,٠٧	١١/٦,٣٥ و ١٥/٨,٧	قلب واحد وثلاثة قلوب بستارة
١ و ١	٢٢/١٢,٧ و ٣٣/١٩	قلب واحد وثلاثة قلوب

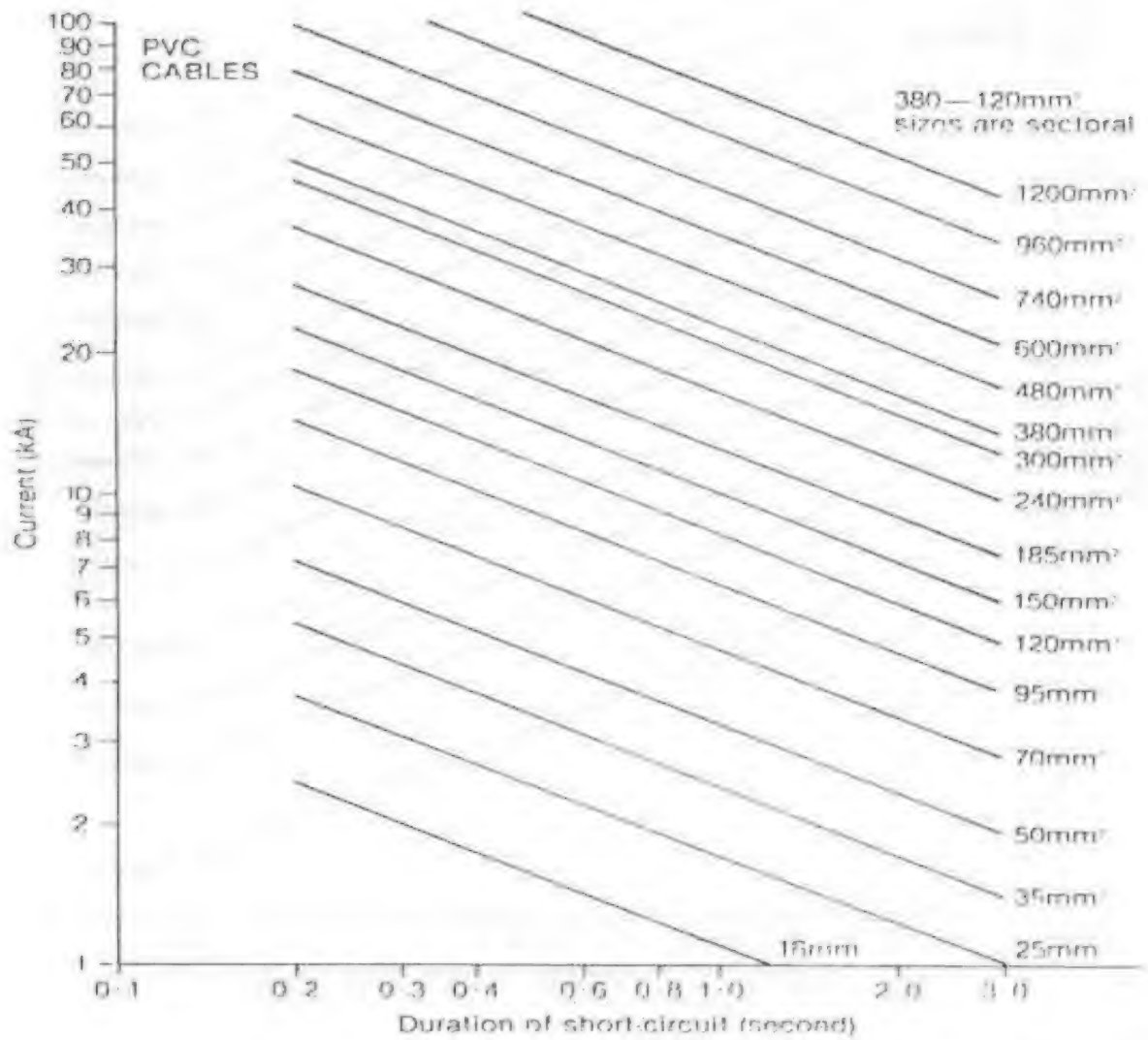




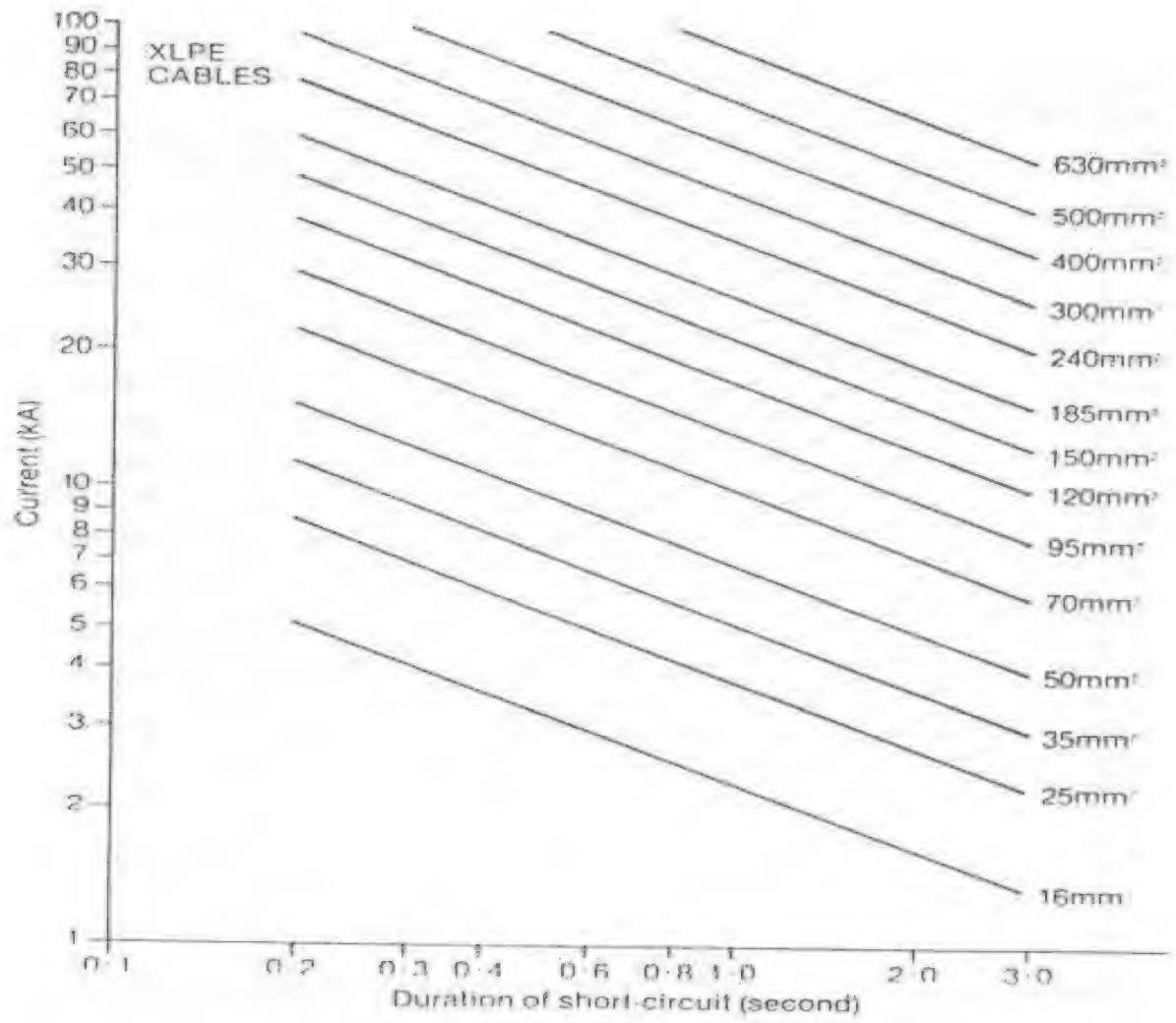
شكل ٦ - ٢ مقننات تيار القصر للكابلات المعزولة بالورق وموصلات نحاسية. ترفع هذه المقننات بنفس النسب الموجودة تحت الشكل ٦ - ١ للجهود الأعلى.



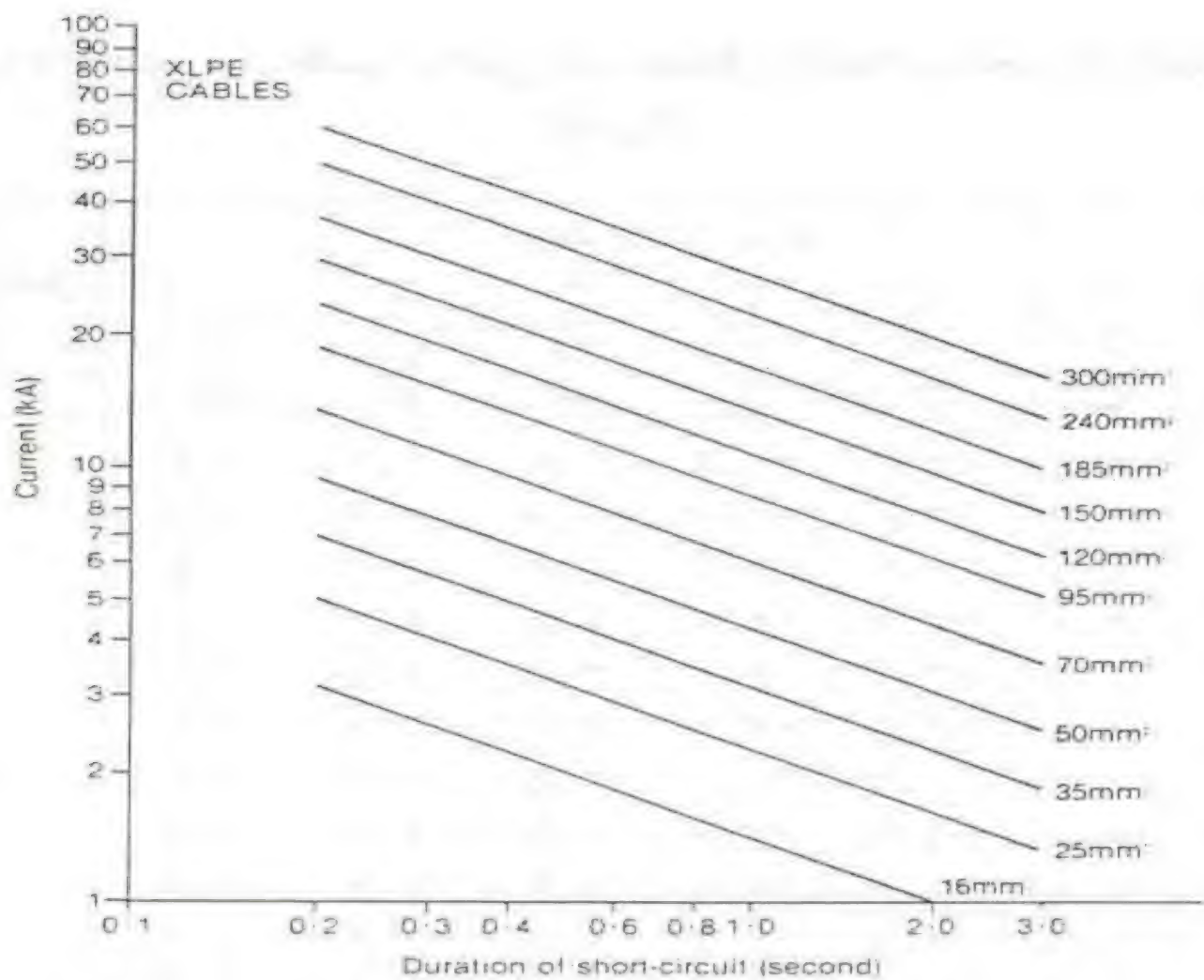
شكل ٦ - ٣ مقننات تيار القصر لكابلات PVC جهد ١ ك ف  
بموصلات نحاسية (على أساس درجة حرارة نهائية  
للموصل ١٥٠°م حتى مقطع ٣٠٠مم² ودرجة حرارة  
نهائية ١٣٠°م للموصلات الأكبر من ذلك).



شكل ٦ - ٤ مقننات تيار القصر لكابلات PVC جهد ١ ك ف  
بموصلات ألومنيوم (على أساس درجة حرارة نهائية  
للموصل ١٥٠ م حتى مقطع ٣٠٠ مم<sup>2</sup> ودرجة حرارة  
نهائية ١٣٠ م للموصلات الأكبر من ذلك).



شكل ٦ - ٥ مقننات تيار القصر لكابلات XLPE بموصلات نحاس على أساس ارتفاع ١٦٠م في درجة الحرارة.



شكل ٦ - ٦ مقننات تيار القصر لكابلات XLPE بموصلات  
الومنيوم على أساس ارتفاع ١٦٠م في درجة الحرارة.



جدول ١٤-٦ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات العوازل الورقية وحيدة القلب<sup>١</sup>

جهد الكابل ك ف							حجم الموصل مم <sup>٢</sup>
١٩/٣٣	٢٧/٢٢	٨,٧/١٥	٤٥/١١	٢,٦/٢,٦	١,٩/٢,٦	١,٦/٢,٦	
٠٣,٨	٠٢,٩	٠٢,٣	٠١,٩	١,٧	١,٦	١,٤	٥٠
٠٤,٠	٠٣,١	٠٢,٥	٠٢,٣	١,٩	١,٨	١,٦	٧٠
٠٤,٦	٠٣,٦	٠٢,٩	٠٢,٥	٢,٣	٢,٠	١,٩	٩٥
٠٤,٨	٠٣,٨	٠٣,٢	٠٢,٩	٢,٥	٢,٤	٢,٢	١٢٠
٠٥,٣	٠٤,٣	٠٣,٦	٠٣,١	٣,٠	٢,٦	٢,٥	١٥٠
٠٥,٨	٠٤,٦	٠٣,٩	٠٣,٦	٣,٢	٣,٠	٢,٩	١٨٥
٠٦,٣	٠٥,٣	٠٤,٦	٠٤,٠	٣,٨	٣,٤	٣,٣	٢٤٠
٠٦,٨	٠٥,٧	٠٤,٩	٠٤,٧	٤,٢	٤,٠	٣,٩	٣٠٠
٠٧,٧	٠٦,٦	٠٥,٧	٠٥,٥	٤,٩	٤,٧	٤,٧	٤٠٠
٠٨,٨	٠٧,٦	٠٦,٨	٠٦,١	٥,٧	٥,٦	٥,٦	٥٠٠
١٠,١	٠٨,٨	٠٧,٩	٠٧,٢	٦,٨	٦,٦	٦,٦	٦٣٠
١١,٤	١٠,١	٠٩,١	٠٨,٣	٧,٩	٧,٧	٧,٧	٨٠٠
١٣,٠	١١,٦	١٠,٥	١٠,٢	٩,٢	٩,٠	٩,٠	١٠٠٠
١٣,٢	١١,٧	١٠,٦	٠٩,٨	—	—	—	**٩٦٠
١٤,٩	١٣,٤	١٢,٢	١١,٨	—	—	—	**١٢٠٠

\* قيم التيار بالكيلو أمبير لفترة زمنية ١ ثانية.

\*\* كابلات بموصلات نحاسية فقط.



جدول ١٥-٦ أقصى تيار قصر أرضي غير متمثل لكابلات العوازل الورقية عديدة القلوب\*

حجم الموصل مم <sup>2</sup>	١/٠,٦ ك ف	١/٠,٩ ك ف	١/١,٦ ك ف	١/٢,٥ ك ف	١/٣,٥ ك ف	١/٥,٠ ك ف	١/٧,٥ ك ف	١/١٠,٠ ك ف
٤	٣,٤	٣,٤	٣,٤	٣,٤	٣,٤	٣,٤	٣,٤	٣,٤
٦	٣,٦	٣,٦	٣,٦	٣,٦	٣,٦	٣,٦	٣,٦	٣,٦
١٠	٤,٩	٤,٩	٤,٩	٤,٩	٤,٩	٤,٩	٤,٩	٤,٩
١٦	٤,٤	٤,٤	٤,٤	٤,٤	٤,٤	٤,٤	٤,٤	٤,٤
٢٥	٥,٢	٥,٢	٥,٢	٥,٢	٥,٢	٥,٢	٥,٢	٥,٢
٣٥	٦,٠	٦,٠	٦,٠	٦,٠	٦,٠	٦,٠	٦,٠	٦,٠
٥٠	٦,٨	٦,٨	٦,٨	٦,٨	٦,٨	٦,٨	٦,٨	٦,٨
٧٠	٨,٧	٨,٧	٨,٧	٨,٧	٨,٧	٨,٧	٨,٧	٨,٧
٩٥	١٠,١	١٠,١	١٠,١	١٠,١	١٠,١	١٠,١	١٠,١	١٠,١
١٢٠	١١,٤	١١,٤	١١,٤	١١,٤	١١,٤	١١,٤	١١,٤	١١,٤
١٥٠	١٥,٣	١٥,٣	١٥,٣	١٥,٣	١٥,٣	١٥,٣	١٥,٣	١٥,٣
١٨٥	١٧,١	١٧,١	١٧,١	١٧,١	١٧,١	١٧,١	١٧,١	١٧,١
٢٤٠	١٩,٤	١٩,٤	١٩,٤	١٩,٤	١٩,٤	١٩,٤	١٩,٤	١٩,٤
٣٠٠	٢١,٨	٢١,٨	٢١,٨	٢١,٨	٢١,٨	٢١,٨	٢١,٨	٢١,٨
٤٠٠	٢٥,٠	٢٥,٠	٢٥,٠	٢٥,٠	٢٥,٠	٢٥,٠	٢٥,٠	٢٥,٠

\* قيمة التيار بالكيلو أمبير لفترة زمنية ١ ثانية.

جدول ١٦-٦ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات عوازل PVC  
بموصلات ألومنيوم مصممة ومسلحة\*

تسليح صلب				تسليح ألومنيوم		حجم الموصل مم <sup>2</sup>
٣,٣/١,٩ ك ف	١/٠,٦ ك ف	٣- قلب	٤- قلب	٣- قلب	١/٠,٦ ك ف	٣,٣/١,٩ ك ف
قلب	قلب واحد	قلب واحد	قلبان	قلب واحد	قلب واحد	قلب واحد
٣,٣	٢,٧	١,٨	١,٦			
٣,٥	٣,٢	٢,٧	٢,٤			
٣,٨	٣,٥	٣,١	٢,٦			
٥,١	٥,٠	٣,٥	٤,٠	٣,٢	٢,٨	
٥,٧	٥,٥	٥,٠	٤,٤	٣,٦	٣,٢	
٦,٢	٦,٥	٥,٧	٤,٨	٥,٢	٣,٦	
٨,٤	٨,٩	٦,١		٥,٦	٥,٢	
٩,١	٩,٧	٨,٤		٥,٩	٥,٧	
٩,٧	١٠,٨	٩,٥		٦,٤	٦,٢	
١٠,٦	١٢,١	١٠,٦		٧,٠	٧,٠	
١١,٧	١٣,٤	١١,٧		٧,٦	٧,٦	
				١٠,٩	١٠,٩	
				١٢,٢	١٢,٢	
				١٢,٩	١٢,٩	
				١٧,٨	١٧,٨	
				٢٠,٢	٢٠,٢	
				٢٢,١	٢٢,١	
						١٦
						٢٥
						٣٥
						٥٠
						٧٠
						٩٥
						١٢٠
						١٥٠
						١٨٥
						٢٤٠
						٣٠٠
						٣٨٠
						٤٨٠
						٦٠٠
						٧٤٠
						٩٦٠
						١٢٠٠

\* قيمة التيار بالكيلو أمبير لفترة زمنية ١ ثانية

جدول ٦-١٧ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات عوازل PVC  
بموصلات نحاس ومسلحة\*

حجم الموصل مم <sup>٢</sup>	تسليح الألمنيوم		تسليح صلب		
	١/٠,٦ ك ف	٣,٣/١,٩ ك ف	١/٠,٦ ك ف	٣,٣/١,٩ ك ف	٣,٣/١,٩ ك ف
	قلب واحد	قلب واحد	قلبان	٣ - قلب	٤ - قلب
١,٥			٠,٧	٠,٧	٠,٧
٢,٥			٠,٨	٠,٨	٠,٩
٤			٠,٩	١,٠	١,٥
٦			١,٠	١,٥	١,٧
١٠			١,٨	١,٩	٢,١
١٦			١,٧	١,٩	٢,٧
٢٥			٢,٧	٢,٩	٣,٦
٣٥			٢,٩	٣,٣	٣,٧
٥٠	٣,١	٣,٥	٣,٣	٣,٧	٥,٤
٧٠	٣,٥	٣,٩	٣,٧	٥,٣	٦,١
٩٥	٤,٠	٥,٧	٥,٤	٦,١	٧,٠
١٢٠	٥,٧	٦,٢	٥,٨	٦,٦	٩,٧
١٥٠	٦,٤	٦,٥	٦,٤	٩,٣	١٠,٨
١٨٥	٧,٠	٧,٠	٨,٩	١٠,٢	١١,٧
٢٤٠	٧,٨	٧,٨	٩,٩	١١,٤	١٣,٢
٣٠٠	٨,٦	٨,٦	١١,٠٠	١٢,٧	١٤,٧
٤٠٠	١٢,٢	١٢,٢	١٢,٣	١٤,٠	٢٠,٦
٥٠٠	١٣,٤	١٣,٤			
٦٣٠	١٤,٦	١٤,٦			
٨٠٠	٢٠,٦	٢٠,٦			
١٠٠٠	٢٢,٩	٢٢,٩			

جدول ٦-١٨ أقصى تيار أرضي غير متماثل لكابلات عوازل XLPE  
بموصلات الألمنيوم مصممة ومسلحة\*

تسليح صلب				تسليح الألمنيوم		حجم الموصل مم <sup>2</sup>
٣,٣/١,٩	١/٠,٦ ك ف	٣- قلب	٤- قلب	٣,٣/١,٩ ك ف	١/٠,٦ ك ف	
٢,٧	١,٦	١,٤	١,٢			١٦
٣,٠	٢,٦	٢,٣	١,٥			٢٥
٣,٢	٢,٩	٢,٦	٢,٢			٣٥
٤,٥	٣,٣	٢,٩	٢,٤	٢,٨	١,٦	٥٠
٥,٠	٤,٩	٣,٣	٢,٨	٣,١	٢,٦	٧٠
٥,٥	٥,٤	٤,٨	٤,١	٣,١	٣,٠	٩٥
٧,٤	٧,٦	٥,٢		٤,٣	٣,٢	١٢٠
٨,٠	٨,٤	٧,٤		٤,٦	٤,٨	١٥٠
٨,٦	٩,٤	٨,٢		٥,٢	٥,٢	١٨٥
٩,٦	١٠,٥	٩,٢		٥,٧	٥,٧	٢٤٠
١٠,٣	١١,٧	١٠,١		٦,٣	٦,٣	٣٠٠

\* قيمة التيار بالكيلوأمبير لفترة زمنية ١ ثانية

جدول ١٩-٦ أقصى تيار قصر أرضي غير متماثل لكابلات عوازل XLPE  
بموصلات نحاسية ومسلحة\*

تسليح الصلب				تسليح ألومنيوم		حجم الموصل مم <sup>2</sup>
٣.٣/١.٩	١/٠.٦ ك ف	٣- قلب ٤- قلب ٣- قلب	قلبان	٣.٣/١.٩ ك ف	١/٠.٦ ك ف	
٣.١	١.٩	١.٧	١.٧			١٦
٣.١	٢.٧	٢.٤	١.٧			٢٥
٣.٣	٣.١	٢.٧	٢.٤			٣٥
٤.٦	٣.٥	٣.٠	٢.٦	٢.٧	١.٨	٥٠
٥.١	٥.١	٣.٥	٣.١	٣.١	٢.٧	٧٠
٥.٧	٥.٧	٥.٠	٤.٤	٣.٣	٣.١	٩٥
٧.٨	٨.٠	٥.٥	٤.٩	٤.٨	٣.٣	١٢٠
٨.٤	٩.٠	٧.٨	٥.٤	٥.١	٤.٨	١٥٠
٩.٠	٩.٩	٨.٦	٧.٤	٥.٧	٥.٤	١٨٥
٩.٩	١١.٣	٩.٧	٨.٤	٦.٠	٦.٠	٢٤٠
١٠.٩	١٢.٤	١٠.٥	٩.٢	٦.٨	٦.٤	٣٠٠
				٩.١	٩.١	٤٠٠
				١٠.٥	١٠.٥	٥٠٠
				١١.٨	١١.٨	٦٣٠

\* قيمة التيار بالكيلوأمبير لفترة زمنية ١ ثانية



## رابعاً: هبوط الجهد Voltage drop

يجب عند اختيار الكابل معرفة مقدار الهبوط في الجهد بين طرفيه، حيث يحدد ذلك مقدار تنظيم الجهد Voltage regulation بين طرفي الكابل وكذلك عند كل حمل.

جرت العادة على أن يُعطى الهبوط الذي يسببه مرور التيار في موصل الكابل على أساس كل موصل على حدة، ويُحسب عادة بالمللي فولت لكل أمبير لكل متر من طول الكابل. ويمكن حسابه من العلاقتين الآتيتين:

$$mV = 2Z \quad \text{لدائرة أحادية الطور}$$

$$mV = \sqrt{3} Z \quad \text{لدائرة ثلاثة الأطوار}$$

حيث:  $mV$  = هبوط الجهد بالمللي فولت/ أمبير/ متر من طول الكابل.  
 $Z$  = المعاوقة لكل موصل/ كيلومتر من طول الكابل بالأوم عند أقصى درجة حرارة تشغيل.

ونلاحظ ما يأتي:

أ - في دوائر الطور الواحد يتم حساب  $Z$  لموصلي الدائرة (موصل الطور وموصل التعادل).

ب - في الدوائر ثلاثية الأطوال تكون  $Z$  هي معاوقة موصل الطور فقط.

ح - لإيجاد النسبة المئوية لهبوط الجهد تقسم قيمة الهبوط في الجهد على جهد الطور في دوائر الطور الواحد وعلى جهد الخط في الدوائر ثلاثية الأطوار.

ويتم اختيار الكابل بحيث لا يتعدى هبوط الجهد بين طرفي الكابل الحدود المسموح بها في المواصفات القياسية. يتضح من هنا أهمية أخذ قيمة هبوط الجهد في الاعتبار، حيث يمكن أن نجد أن الكابل له قدرة على حمل التيار المطلوب إلا أن هبوط الجهد بين طرفيه يتعدى المسموح بها بسبب طول مسار الكابل.

تعطى أغلب مصانع الكابلات جداول تحتوي على قيم الهبوط في الجهد عند قيم مختلفة من تيار الموصل.